

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

### **Determinació de les propietats mecàniques del PLA obtingut per fabricació additiva**

#### **MEMÒRIA**

**Autor:** Marina Blasco Sierra  
**Director:** M. Magdalena Pastor Artigues  
**Convocatòria:** Juny 2019



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

El PLA és un material termoplàstic utilitzat en aplicacions mèdiques, àmpliament utilitzat en la fabricació d'additius 3D a causa de la seva biocompatibilitat, biodegradabilitat, bona resistència mecànica, facilitat d'impressió i baix cost.

L'objectiu principal d'aquest treball és caracteritzar l'àcid polilàctic (PLA) imprès en 3D enfront de tres tipus d'esforç: tracció, compressió i flexió. Diferents paràmetres influeixen en les propietats finals de les peces fabricades. No obstant, totes les mostres han estat fabricades amb els mateixos paràmetres d'impressió, concretament la direcció d'impressió i el percentatge d'*infil*, de manera que aquests no són factors d'estudi. Com que no hi ha normativa específica per als materials fabricats en tecnologia 3D, s'han seguit les regulacions d'ASTM D638, D695 i D790 per determinar les seves propietats de tracció, compressió i flexió, respectivament. També s'analitza la influència de la longitud i la forma de la secció transversal en els valors de resistència i mòdul elàstic per als assaigs de compressió. Finalment, es fa un model d'elements finits per intentar explicar aquestes diferències, incloent la no linealitat geomètrica (anàlisi no lineal del material geomètric GMNA) per reproduir deformacions finites que es produeixen durant les proves físiques.

S'han determinat les propietats mecàniques per als tres esforços amb una variabilitat prou baixa. També s'han observat diferències en els valors d'aquestes propietats en el cas dels assaigs de compressió per a les diferents longituds i formes de la secció transversal, obtenint menys variabilitat en les provetes cilíndriques. En realitzar la simulació per elements finits, tot i incloure un anàlisi amb no linealitat en la geometria, no ha estat possible reproduir el comportament observat als assaigs, al no tenir en compte el procés de fabricació.



# Sumari

|  |           |
|--|-----------|
| <b>SUMARI</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1. PREFACI</b>  | <b>7</b>  |
| 1.1. Origen del projecte .....                               | 7         |
| 1.2. Motivació .....   | 7         |
| <b>2. INTRODUCCIÓ</b>  | <b>9</b>  |
| 2.1. Objectius del projecte .....                            | 9         |
| 2.2. Abast del projecte .....                                | 9         |
| <b>3. MATERIAL I TÈCNIQUES DE FABRICACIÓ</b>                 | <b>10</b> |
| 3.1. Fabricació additiva.....                                | 10        |
| 3.1.1. FDM - Modelat per Deposició Fosa.....                 | 10        |
| 3.1.2. Paràmetres de la fabricació amb FDM.....              | 11        |
| 3.1.3. Propietats mecàniques del PLA fabricat amb FDM.....   | 11        |
| 3.2. Àcid polilàctic (PLA).....                              | 12        |
| 3.2.1. Síntesi del PLA .....                                 | 12        |
| 3.2.2. Propietats mecàniques del PLA .....                   | 13        |
| 3.2.3. Aplicacions.....                                      | 13        |
| <b>4. ESTAT DE L'ART</b>                                     | <b>15</b> |
| <b>5. ASSAIGS EXPERIMENTALS</b>                              | <b>16</b> |
| 5.1. Fabricació de les provetes.....                         | 16        |
| 5.1.1. Impressió de les provetes .....                       | 18        |
| 5.2. Realització dels assaigs .....                          | 22        |
| 5.2.1. TRACCIÓ.....  | 22        |
| 5.2.1.1. Gràfic tensió-deformació .....                      | 23        |
| 5.2.1.2. Mòdul elàstic longitudinal (Young).....             | 24        |
| 5.2.1.3. Coeficient de Poisson.....                          | 25        |
| 5.2.1.4. Resistència a tracció .....                         | 26        |
| 5.2.1.5. Elongació .....                                     | 26        |
| 5.2.1.6. Fallada de les provetes .....                       | 27        |
| 5.2.1.7. Discussió de resultats dels assaigs de tracció..... | 27        |
| 5.2.2. COMPRESSIÓ .....                                      | 27        |
| 5.2.2.1. Gràfic tensió-deformació .....                      | 28        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.2.2.2. Mòdul elàstic longitudinal (Young).....                             | 31        |
| 5.2.2.3. Resistència a compressió .....                                      | 32        |
| 5.2.2.4. Elongació .....   | 32        |
| 5.2.2.5. Fallada de les provetes .....                                       | 33        |
| 5.2.2.6. Discussió de resultats dels assaigs de compressió.....              | 33        |
| 5.2.3. FLEXIÓ .....  | 34        |
| 5.2.3.1. Gràfic tensió-deformació .....                                      | 35        |
| 5.2.3.2. Mòdul elàstic tangent .....   | 37        |
| 5.2.3.3. Resistència a flexió .....  | 37        |
| 5.2.3.4. Elongació .....   | 37        |
| 5.2.3.5. Fallada de les provetes .....                                       | 38        |
| 5.2.3.6. Discussió de resultats dels assaigs de flexió.....                  | 38        |
| 5.3. Comparació de resultats .....   | 38        |
| 5.3.1. Comparació de les provetes assajades a compressió .....               | 40        |
| <b>6. SIMULACIÓ PER ELEMENTS FINITS .....</b>                                | <b>42</b> |
| 6.1. Tracció .....   | 43        |
| 6.2. Compressió.....   | 48        |
| 6.3. Flexió .....  | 58        |
| <b>7. PRESSUPOST .....</b>   | <b>62</b> |
| <b>8. IMPACTE MEDIAMBIENTAL .....</b>  | <b>63</b> |
| <b>9. CONCLUSIONS .....</b>  | <b>65</b> |
| <b>AGRAÏMENTS .....</b>  | <b>67</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>  | <b>68</b> |
| <b>ANNEXES .....</b>   | <b>71</b> |
| A. Fitxa tècnica del PLA utilitzat per a la fabricació de les provetes ..... | 71        |
| B. Taules amb el recull de mesures prèvies als assaigs .....                 | 72        |
| a. Tracció .....   | 72        |
| b. Compressió .....  | 73        |
| c. Flexió.....   | 74        |

# 1. Prefaci

Per començar es presentarà el projecte i la motivació d'aquest.

## 1.1. Origen del projecte

Els departaments d'Enginyeria Mecànica i Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona duen a terme un projecte nacional sobre la fabricació additiva amb alúmina endurida amb zirconi (ZTA - *Zirconia Toughened Alumina*) analitzant la viabilitat de fabricar components per a pròtesis biomèdiques.

En el marc d'aquesta recerca, i en el procés d'adaptació de la impressora amb tecnologia FDM que s'utilitzarà per imprimir el material ZTA, s'ha realitzat una campanya experimental d'assaigs de provetes impreses en material PLA, més assequible econòmicament i més fàcil d'imprimir, per tal d'analitzar la viabilitat d'impressió.

## 1.2. Motivació

La fabricació 3D és una nova tecnologia en la que s'està innovant molt i representa un camp d'estudi interessant. A més, la possibilitat d'avançar en el coneixement sobre la utilització del PLA com a material biodegradable substituint els polímers petroquímics em sembla un repte prou motivador.

D'altra banda, aquest treball inclou realitzar assaigs al laboratori i té una gran part experimental que habitualment no es té l'oportunitat d'afrontar durant el grau.

Per últim, la simulació dels assaigs per validar el model permet aprofundir i practicar més el mètode dels elements finits utilitzant el software Ansys. Tot i que és un programari que s'utilitza al llarg del grau, sempre es fa seguint unes pautes i al realitzar aquest treball he pogut combinar i posar en pràctica tot allò après, i espavilar-me en l'aplicació de conceptes que eren nous.





## **2. Introducció**

En aquest apartat es descriuran breument els objectius i l'abast del projecte.

### **2.1. Objectius del projecte**

Aquest treball està dedicat principalment a estudiar les propietats mecàniques de l'àcid polilàctic (PLA) obtingut per fabricació additiva sota l'aplicació de diferents esforços. Es volen avaluar les diferències obtingudes en el càlcul d'aquestes propietats a partir d'assaigs a tracció, compressió i flexió.

En segon lloc, es vol analitzar la influència de la forma de la secció transversal i de la longitud de les provetes en la resistència i el mòdul elàstic obtinguts de l'assaig de compressió, tal com suggereix la norma ASTM D695, ja que tampoc hi ha gaire literatura disponible sobre aquest tema.

Finalment, es vol crear un model per elements finits per intentar explicar aquestes diferències, en cas de produir-se. Aquest model reproduirà les condicions d'assaig i inclourà no linealitat de geometria per tal de tenir en compte les grans deformacions que tenen lloc durant l'assaig.

### **2.2. Abast del projecte**

Les propietats mecàniques de les provetes depenen de molts paràmetres del material i de la fabricació additiva (anisotropia, etc.). En aquest treball, aquests paràmetres d'impressió no són factors d'estudi. Per aquest motiu, totes ells es mantindran constants per a totes les provetes.

A les simulacions per elements finits, es modelaran les peces com un material sòlid continu, homogeni i isòtrop, sense simular la seva mesoestructura ni tenir en compte el procés de fabricació.

Actualment no existeix una normativa específica per assajar provetes de PLA fetes per fabricació additiva, ni materials fabricats amb tecnologia 3D en general; per tant, els assaigs s'han basat en normatives existents sobre tracció, compressió i flexió en polímers. Tampoc existeix gaire literatura que relacioni la forma i longitud de les provetes amb les propietats mecàniques obtingudes a compressió, és a dir que es realitza aquest estudi sense informació per comparar en aquest sentit.

### 3. Material i tècniques de fabricació

#### 3.1. Fabricació additiva

La fabricació additiva, coneguda com impressió 3D, consisteix en el procés d'unir materials per crear una peça a partir de dades d'un model tridimensional creat capa a capa, usualment afegint el material en pols o líquid (1).

El procés comença dissenyant un model 3D de la peça amb un software de CAD, que posteriorment es transforma en el format necessari per a la màquina que s'usarà, freqüentment format STL (*Stereolithography*) (2). A continuació s'envia a la impressora, que imprimirà capes 2D una sobre l'altra, obtenint-se un objecte tridimensional. És possible que la peça necessiti processos posteriors en funció de les propietats i acabats que es desitgin.

Existeixen 7 categories diferents de fabricació additiva: fotopolimerització (SLA, DLP), fusió làser de capa de pols (SLS, SLM, DMLS, EBM, SHS), injecció de material (DOD, NPJ), injecció d'aglutinant, deposició directa d'energia (LENS, EBAM), laminació de fulls (LMD) i, per últim, extrusió de material (FDM, FFF), que és el tipus de fabricació que s'explicarà amb més detall a continuació (1) (3).

##### 3.1.1. FDM - Modelat per Deposició Fosa

El modelat per deposició fosa o FDM (*Fused Deposition Modeling*) és un mètode de fabricació additiva que deposita per extrusió el filament de polímer fos i va generant la peça en tres dimensions afegint capes al disseny.

El polímer és extruït amb un injector escalfat que permet que el material extruït es trobi en estat semi fos. Per tant, quan es col·loca la capa superior, el polímer s'uneix a la capa anterior. Aquest capçal es mou al pla X-Y mentre deposita el material segons el model introduït al software. Aquesta disposició del material en una direcció és la causa del comportament anisòtrop de les peces (2). La Figura 3.1 il·lustra aquest procés de fabricació.

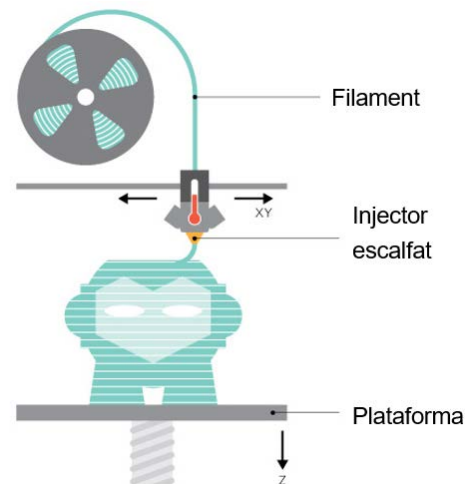


Figura 3.1 Procés de FDM (20)

Per a les peces que presenten alguna cara lateral amb un angle inferior a 45° amb el pla horitzontal, existeix un altre injector que deposita un material de suport on es podrà recolzar la peça durant la impressió i que serà eliminat posteriorment (2).

### 3.1.2. Paràmetres de la fabricació amb FDM

Hi ha diversos paràmetres a tenir en compte durant la impressió amb FDM, a continuació s'expliquen breument alguns d'aquests paràmetres:

- Temperatura del material, de l'injector i de l'entorn de fabricació.
- Amplada del filament a cada capa
- Velocitat d'impressió.
- Alçada de cada capa: afectarà al cost i temps de fabricació, així com a l'acabat final de la peça.
- Orientació del *raster*: descriu la orientació en la que es deposita el material a cada capa. A la Figura 3.2 es poden veure tres angles de raster diferents (a. 0°; b. 90°; c. 45°).

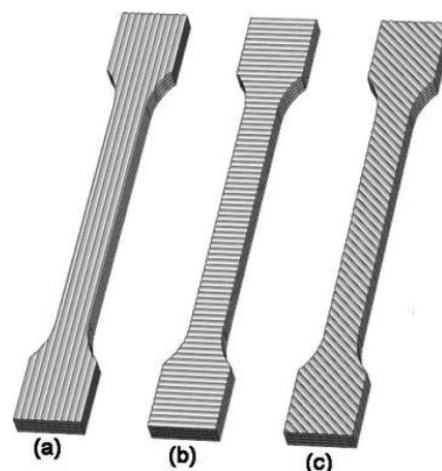


Figura 3.2 Diferents angles de raster (19)

- Direcció de fabricació: té un efecte en l'aspecte final de la peça i també en les seves propietats mecàniques. En funció de l'angle entre l'aplicació de la càrrega i les capes, presenta respostes diferents.



Figura 3.3 Percentatges d'infil. D'esquerra a dreta: 20%, 50% i 75% (4)

- *Infil*: estructura interna de la peça (Figura 3.3). En funció de la concentració, es requereix un temps d'impressió diferent i s'obtenen una densitat i resistències diferents (4).

### 3.1.3. Propietats mecàniques del PLA fabricat amb FDM

Les propietats del material una vegada imprès no són les mateixes que les del material inicial. Existeixen diversos estudis realitzats envers la recerca d'aquestes propietats, però hi ha molts paràmetres que influeixen en els resultats obtinguts. A més, cal destacar el comportament anisòtrop dels materials per fabricació additiva i la diversitat de paràmetres comentats a l'apartat anterior.

A continuació, es mostra un recull de les propietats trobades bibliogràficament a diferents fonts que segueixen condicions similars a les que es seguiran en aquest treball (5), (6), (7), (8):

Taula 3.1 Propietats mecàniques del PLA fabricat per FDM

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| Mòdul elàstic a tracció (MPa)     | 2346-2850 |
| Resistència a tracció (MPa)       | 33-65     |
| Elongació al punt de fluència (%) | 2,1-3,3   |
| Mòdul de flexió (MPa)             | 2410-3000 |
| Resistència a flexió (MPa)        | 60-100    |
| Mòdul elàstic a compressió (MPa)  | 1000-1640 |
| Resistència a compressió (MPa)    | 18-94     |

## 3.2. Àcid polilàctic (PLA)

L'àcid polilàctic (PLA), és un termoplàstic biodegradable que prové de l'àcid làctic. A continuació s'explica breument el seu procés d'obtenció, així com algunes propietats i aplicacions d'aquest material.

### 3.2.1. Síntesi del PLA

Com ja s'ha mencionat, el PLA és un derivat de l'àcid làctic (2-hidroxipropanoic). Aquest es pot sintetitzar químicament o per mitjà de la fermentació anaeròbica de substrats orgànics, obtenint sucres. Posteriorment, es duu a terme la polimerització de l'àcid làctic a PLA per mètode directe o indirecte, tal com es mostra a

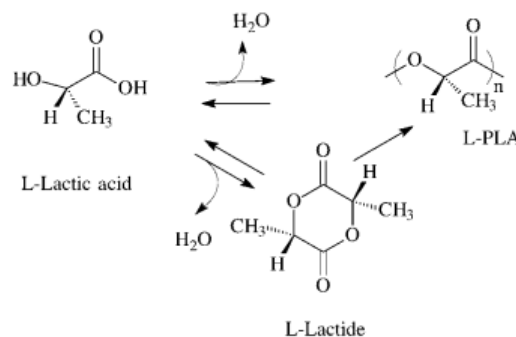


Figura 3.4 Mètodes de polimerització del PLA

la Figura 3.4. El primer consisteix en la condensació de l'àcid làctic per obtenir àcid làctic de baix pes molecular. Per altra banda, el mètode indirecte s'anomena mètode per apertura d'anell, i genera primer un compost intermedi anomenat lactid per arribar al PLA d'alt pes molecular (9). Seguidament es poden dur a terme processos de tractament posterior, que poden implicar reaccions químiques o de conformació. S'hi afegeixen altres components com pigments, estabilitzadors, altres polímers per millorar la flexibilitat, etc. (10).

Per últim, tenint en compte que el PLA és un polímer àmpliament utilitzat per a la impressió 3D, es requereix tenir el material en bobines de filament que s'obtenen habitualment per extrusió.

### 3.2.2. Propietats mecàniques del PLA

Les propietats mecàniques del PLA depenen de diversos factors: el pes molecular, els processos posteriors a la polimerització, l'addició d'altres components, la seva naturalesa cristal·lina o amorfa, etc. No obstant això, les propietats estan al mateix rang que els polímers petroquímics.

A continuació, es mostra una taula comparativa de les propietats mecàniques i tèrmiques de diferents polímers (Taula 3.2).

*Taula 3.2 Comparació de propietats de diferents polímers (11) (12) (5)*

| Propietat                            | PLA       | PETG | ABS  | Nylon 6,6 | PETT |
|--------------------------------------|-----------|------|------|-----------|------|
| Temperatura de transició vítria (°C) | 60        | 80   | 100  | 70        | 68,2 |
| Temperatura de fusió (°C)            | 145-160   | 140  | 230  | 255       | 212  |
| Temperatura màxima de treball (°C)   | 50        | 70   | 85   | 50        | -    |
| Densitat (g/cm <sup>3</sup> )        | 1,26-1,30 | 1,29 | 1,10 | 1,07      | 1,13 |
| Mòdul elàstic (MPa)                  | 3500      | 2200 | 2000 | 3300      | -    |
| Resistència a tracció (MPa)          | 50        | 53   | 41   | 86        | 71   |
| Elongació al punt de fluència (%)    | 6         | 140  | 20   | 46        | 300  |
| Mòdul de flexió (MPa)                | 4000      | 2100 | 2100 | 2800      | 970  |
| Resistència a flexió (MPa)           | 80        | 77   | 97   | 110       | 48   |
| Resistència a compressió (MPa)       | 18        | 55   | 7,5  | 73        | -    |

Com es pot observar a la Taula 3.2, el PLA presenta una resistència a tracció i flexió prou bona. No obstant això, és un material amb un comportament rígid i fràgil amb una elongació al punt de fluència del 6%. També cal destacar que les seves propietats tèrmiques forcen una temperatura de treball màxima de 50°C, aproximadament 35°C inferior a la de l'ABS, polímer que també s'utilitza per a la impressió 3D habitualment.

Cal destacar que aquestes propietats corresponen al material del filament, no al material imprès en 3D, ja que en aquest cas les propietats depenen d'altres paràmetres que s'explicaran més endavant.

### 3.2.3. Aplicacions

L'àcid polilàctic s'usa en una gran varietat d'àmbits industrials degut a les seves propietats i a la seva naturalesa biodegradable, que el converteix en una bona alternativa als productes de

la indústria petroquímica. Per exemple, l'empresa alimentària l'utilitza per a envasos i paquets, i la indústria tèxtil fabrica catifes i altres teixits resistents als raigs UV. Algunes de les aplicacions més importants es donen a l'àmbit biomèdic.

Degut a les excel·lents propietats mecàniques, baix cost i biocompatibilitat del PLA, aquest s'utilitza en diferents camps en medicina i biomedicina. Alguns exemples d'aquestes aplicacions són els següents: ortopèdia, dispositiu d'administració de fàrmacs, enginyeria de teixits o regenerativa, agents antimicrobians, catèters, fils de sutura, biomaterials per a implants i reparació de fractures en cirurgia maxil·lofacial (13).

Totes aquestes aplicacions es basen en el fet que el PLA és biocompatible i es dissol per hidròlisi sense produir components nocius en la degradació, la qual cosa permet utilitzar-lo en implants localitzats a l'interior del cos sense necessitat de dur a terme una segona operació quirúrgica per extreure claus o altres peces de materials com el titani. Un altre ús són les càpsules per alliberar fàrmacs al llarg del temps controlant la velocitat a la que es descomponen en funció del tractament que es fa al material (10).

## 4. Estat de l'art

Els estudis realitzats anteriorment en relació a les propietats mecàniques del PLA obtingut per fabricació additiva acostumen a tractar sobre l'efecte dels diferents paràmetres d'impressió, com l'infil, l'orientació del raster, la direcció de fabricació, etc. Hi ha referències d'autors que realitzen assaigs a tracció, compressió o flexió, però hi ha poca informació sobre estudis experimentals que incloguin els tres assaigs utilitzant provetes fabricades sota les mateixes condicions. Se sap que les propietats mecàniques d'aquest tipus de material tenen una resposta diferent quan se sotmeten a tracció, compressió o flexió; per tant, és necessari conèixer el seu comportament sota cada tipus de càrrega.

L'assaig de tracció és la prova més estudiada. Alguns autors ofereixen referències sobre resistència a compressió o flexió. Altres autors han analitzat el material enfront diferents esforços mecànics. Alguns presenten proves de tensió, compressió i flexió per estudiar el "disseny de càrrega efectiu" en cada cas. Amb prou feines s'han trobat referències per als tres tipus de proves: tensió, compressió i flexió.

Tot i que les normes no són aplicables a la tecnologia d'impressió FDM, la majoria d'assaigs utilitzen les normes ASTM: ASTM D638 per a la prova de tracció, ASTM D695 per a la prova de compressió i ASTM D790 per a la prova de flexió de tres punts. Pel que fa a la forma i les dimensions dels exemplars utilitzats en els diferents assaigs, en general es segueixen les indicacions de les normes. Per a les proves de tracció i flexió, les opcions són bastant clares; no obstant això, per a la prova de compressió s'ofereixen dues possibilitats per a la forma de la secció transversal, i dues longituds de mostra segons la propietat mecànica que es vol obtenir.

En el cas de proves de compressió, l'estàndard ASTM D695 (*Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*) especifica que la proveta de l'assaig ha de ser en forma de cilindre o prisma (quadrat), la longitud del qual és el doble del seu ample o diàmetre. No obstant això, en determinar el mòdul elàstic i tensió de fluència, les dimensions han de ser tal que la longitud sigui quatre vegades l'amplada o el diàmetre de la secció transversal. Tanmateix, s'accepten les dues formes, tot i que s'indica que la forma preferida és prismàtica.

## 5. Assaigs experimentals

Com s'ha mencionat a l'inici, l'objectiu principal d'aquest estudi és trobar de manera experimental les propietats mecàniques de provetes impreses per FDM de PLA per comparar les seves respostes enfront de diferents esforços: tracció, compressió i flexió. Per fer-ho, s'han seguit diversos passos, començant pel disseny i la fabricació de les provetes, seguit dels assaigs al laboratori i per últim el tractament de les dades per obtenir uns resultats. Es realitzaran els càlculs pertinents per obtenir el mòdul elàstic i la resistència a tracció, compressió i flexió.

Per a cada tipus d'assaig s'ha seguit la normativa ASTM corresponent: : ASTM D638-02a *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* (14); ASTM D695-02a *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics* (15); ASTM D790-02 *Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials* (16).

### 5.1. Fabricació de les provetes

D'acord amb la normativa, s'han establert les dimensions de les provetes, així com les condicions dels assaigs que es realitzaran posteriorment. Per intentar reduir al màxim el consum de material i temps de fabricació, es trien les dimensions més petites possibles sempre en el marc de la normativa.

Es fabrica una proveta a tracció, corresponent al tipus I de la normativa ASTM D 638. També es fabrica una proveta a flexió amb les dimensions especificades per a provetes de termoplàstics de la normativa ASTM D 790 . Per últim, es fabriquen 4 tipus de provetes diferents a compressió. Això es deu a que, tal i com s'indica a la normativa, per obtenir valors de mòdul elàstic i resistència és millor fer l'assaig amb provetes més llargues. D'altra banda, es donen dues possibilitats de secció per a les provetes: quadrades i circulars. Per aquest motiu es tenen quatre tipus diferents de provetes assajades a compressió: dues longituds i dues formes secció, amb les nomenclatures especificades a la Taula 5.1 per designar-les, on 'a' correspon a l'amplada del costat de la secció quadrada i 'D' és el diàmetre de la secció circular.



Taula 5.1 Nomenclatura de les provetes d'assaig a compressió

| Nomenclatura           | Secció   | Longitud      |
|------------------------|----------|---------------|
| Prismàtica curta - 2a  | Quadrada | $L=2 \cdot a$ |
| Prismàtica llarga - 4a | Quadrada | $L=4 \cdot a$ |
| Cilíndrica curta - 2D  | Circular | $L=2 \cdot D$ |
| Cilíndrica llarga - 4D | Circular | $L=4 \cdot D$ |

Es realitza el model 3D dels sis tipus de provetes emprant el software SolidWorks. A continuació, es mostren els esquemes per a les 6 provetes, indicant els eixos que es faran servir per l'estudi.

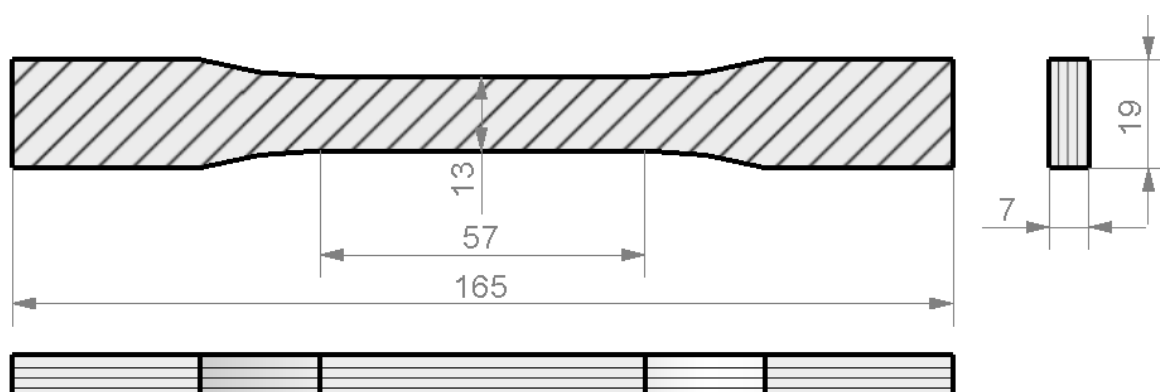


Figura 5.1 Esquema de la proveta per l'assaig a tracció (mesures en mm)

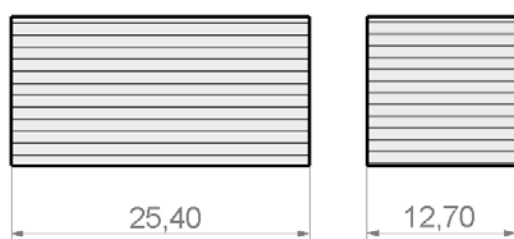


Figura 5.2 Esquema de la proveta curta de secció circular per l'assaig a compressió (mesures en mm)

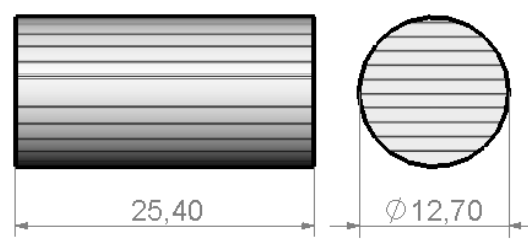


Figura 5.3 Esquema de la proveta curta de secció quadrada per l'assaig a compressió (mesures en mm)

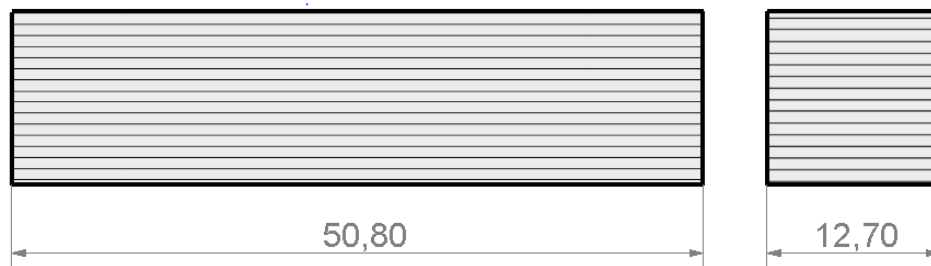


Figura 5.4 Esquema de la proveta llarga de secció quadrada per l'assaig a compressió (mesures en mm)

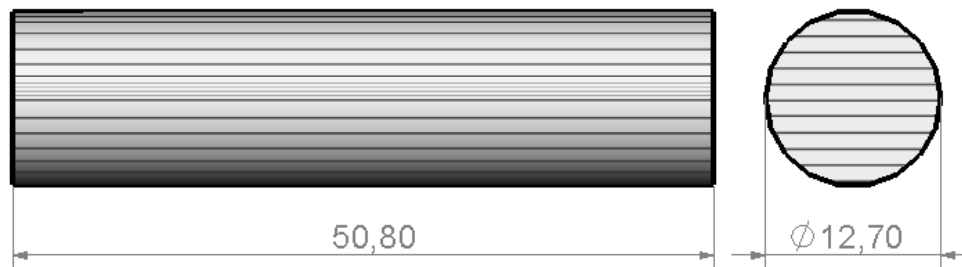


Figura 5.5 Esquema de la proveta llarga de secció circular per l'assaig a compressió (mesures en mm)

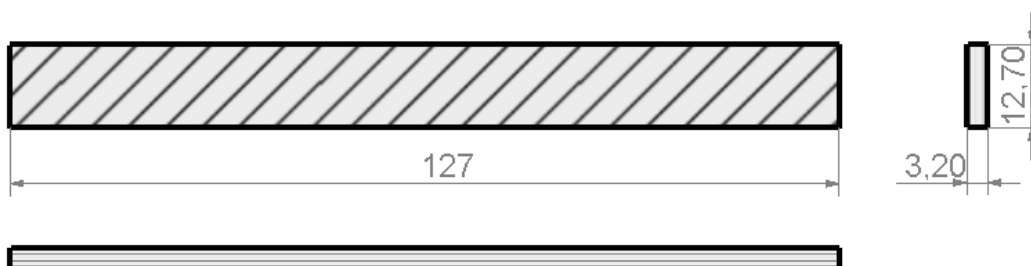


Figura 5.6 Esquema de la proveta per l'assaig a flexió (mesures en mm)

### 5.1.1. Impressió de les provetes

La fabricació de totes les provetes s'ha dut a terme al departament d'Enginyeria Mecànica de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), a la secció de Fabricació. La tècnica emprada per la seva impressió 3D és la FDM, utilitzant PLA blanc de l'empresa BCN 3D. A l'annex A es pot veure la fitxa tècnica d'aquest material. La màquina emprada és un model Sigma v17 de BCN3D. La normativa especifica que calen cinc provetes per realitzar l'assaig, però s'ha decidit fabricar sis provetes de cada tipus, per si es produeix algun imprevist en algun dels assajos. En total 36: 6 provetes de tracció, 6x4 provetes de compressió i 6 de flexió.

En aquest estudi no s'analitza l'efecte que tenen els diferents paràmetres de la fabricació additiva per FDM mencionats a l'apartat 3.1.2. Per tant, fixats uns valors en la fabricació de totes les provetes, l'anàlisi de la seva influència en els resultats està fora de l'abast de l'estudi. Així, s'han intentat fabricar amb el màxim infil possible (90%) i les capes s'orienten en la direcció dels esforços que s'aplicaran durant l'assaig. Aquesta direcció correspon a aquella que fa que les tensions a estudiar siguin paral·leles a les capes d'impressió (2) (3). La orientació del raster utilitzada és de 45°, l'estructura interna queda com indica la Figura 5.7. Cada nova capa s'imprimeix en la direcció del raster contrària a la capa anterior, és a dir, que entre una capa i la següent l'infil està a 90°. A continuació es mostren unes representacions de les provetes on s'aprecia la orientació del raster i la direcció de fabricació amb una fletxa (Figura 5.8 a Figura 5.13). Cal tenir en compte que són representacions qualitatives per mostrar el raster. El tamany en que està representada l'estructura interna està augmentat.

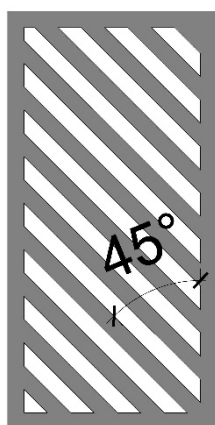


Figura 5.7 Representació de l'estructura interna amb un raster de 45°

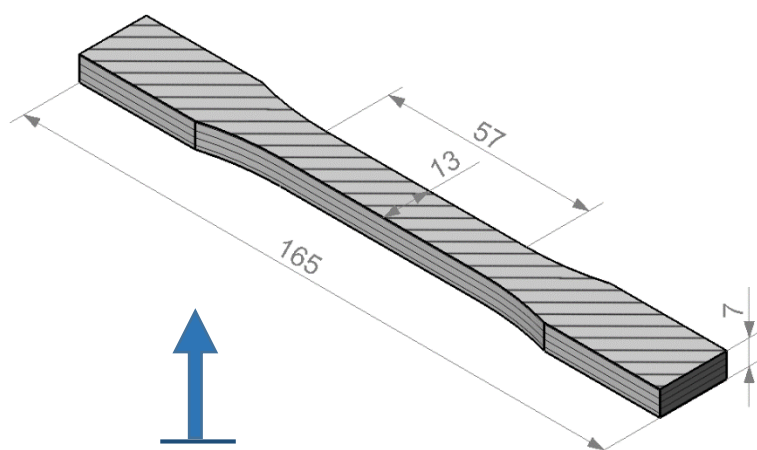


Figura 5.8 Proveta a tracció amb raster (mesures en mm)

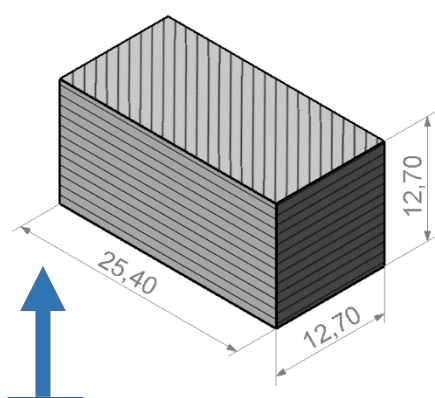


Figura 5.10 Proveta a compressió cilíndrica curta amb raster (mesures en mm)

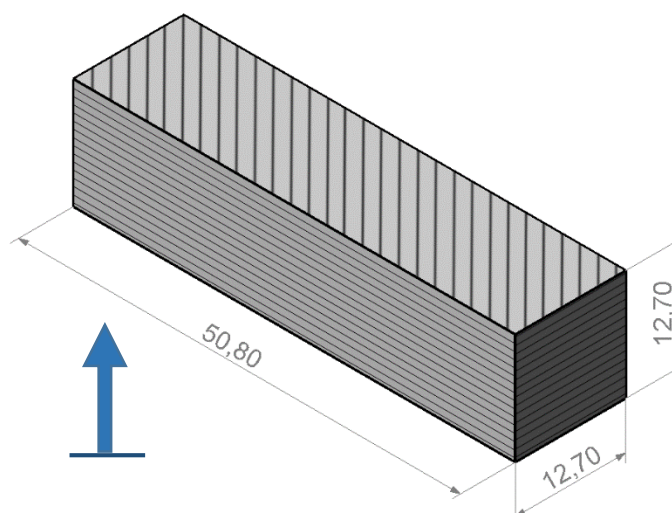


Figura 5.9 Proveta a compressió prismàtica llarga amb raster (mesures en mm)

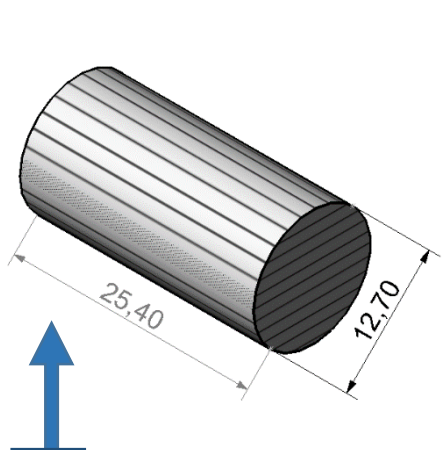


Figura 5.11 Proveta a compressió prismàtica curta amb raster (mesures en mm)

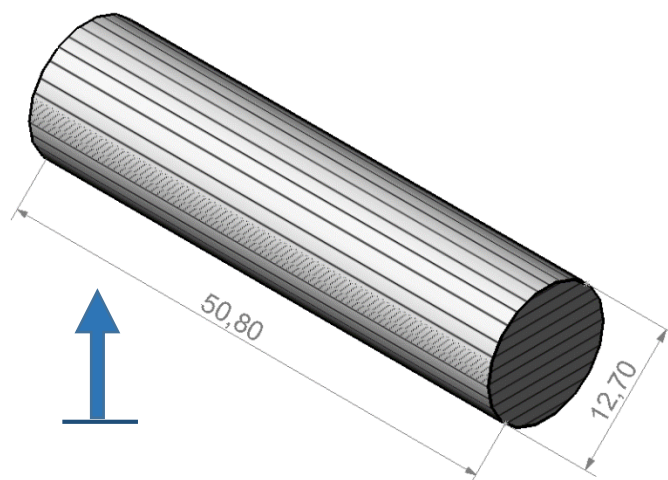


Figura 5.12 Proveta a compressió cilíndrica llarga amb raster (mesures en mm)

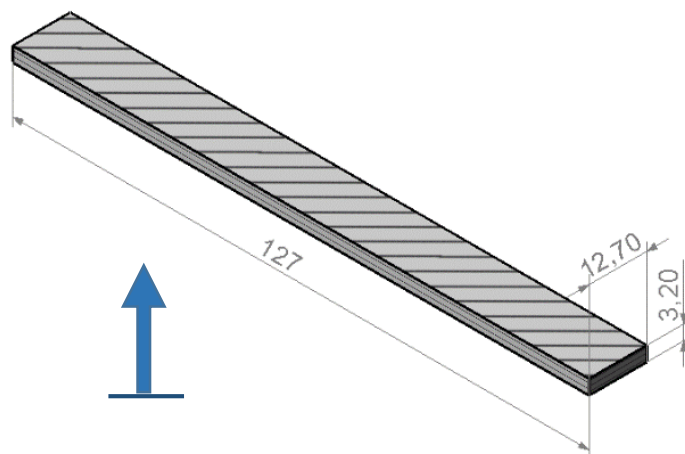


Figura 5.13 Proveta a flexió amb raster (mesures en mm)

Per últim, a la Figura 5.14 s'hi poden veure impreses les 36 provetes, classificades per tipus i numerades per fer l'assaig.

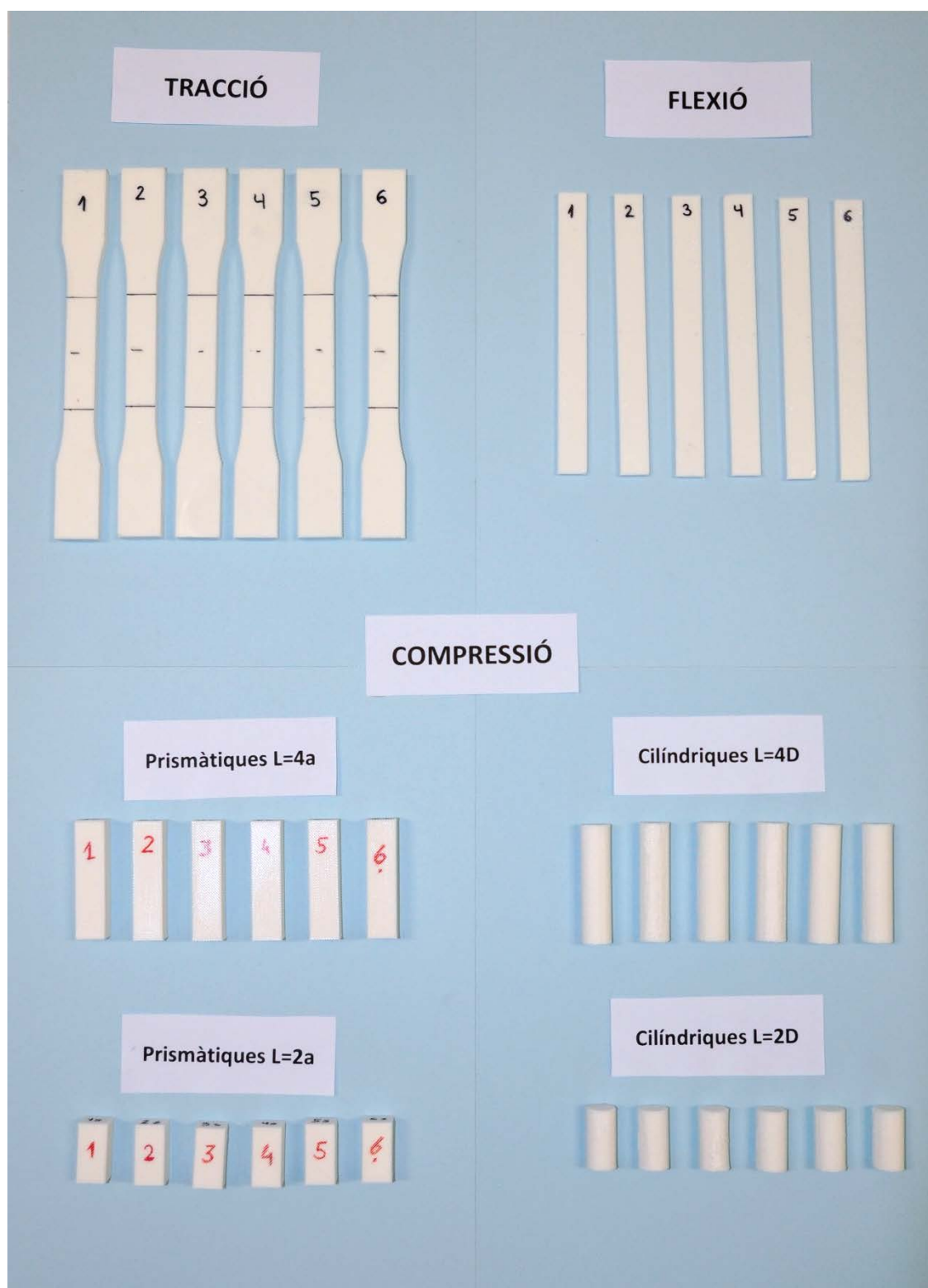


Figura 5.14 Provetes de PLA per fer els assaigs

## 5.2. Realització dels assaigs

Una vegada fabricades totes les provetes, es procedeix a realitzar els assaigs al laboratori. Durant tot el procediment, es segueixen les recomanacions de les normatives mencionades anteriorment. Per fer-ho, primer es numeren totes les provetes, tal i com es veu a la Figura 5.14. Després de classificar-les, es prenen les mesures de la secció central de cada proveta amb un peu de rei, ja que els càlculs es fan respecte a les dimensions de la secció inicial. Es fan 3 mesures per a cada dada que es vol mesurar i se'n fa la mitja. També es pesen totes les provetes individualment i es mesura la longitud total de les provetes de compressió. Totes aquestes mesures es poden trobar a l'Annex B.

Es realitzen assaigs a tracció, compressió i flexió a tres punts. Tots els assaigs es duen a terme amb la mateixa màquina, una Instron model 3366 de 10 kN amb una cèl·lula de càrrega amb Interface 1210CFF i capacitat nominal de  $\pm 10$  KN, com la que es pot veure a la Figura 5.15, posant els accessoris necessaris per a cada tipus d'assaig.

Abans d'iniciar l'assaig, s'especifiquen les diferents condicions i es calibra la màquina. Seguidament, es realitzen els assaigs i es recullen dades automàticament, els quals seran tractades posteriorment per obtenir els resultats.

A continuació, s'explica amb més detall cadascun dels assaigs i es descriu com s'ha fet el tractament de les dades per arribar als resultats desitjats.



Figura 5.15 Maquinaria utilitzada per la realització dels assaigs

### 5.2.1. TRACCIÓ

A la Figura 5.16 es pot veure l'esquema de l'assaig, amb els eixos utilitzats per a l'estudi posterior.

Seguint la normativa D638 (14), es col·loca la proveta i s'ajusten les mordasses (Figura 5.17). Per aquest assaig, interessa obtenir dades de les deformacions longitudinals i transversals. Per tant, s'empren dos extensòmetres i es col·loquen com es veu a la Figura 5.18. L'extensòmetre longitudinal és un model Instron 2630-102 amb una longitud inicial de 10mm. El transversal és un model Instron I3575-250M-ST de 13mm, corresponent a l'amplada de la secció central de la proveta.

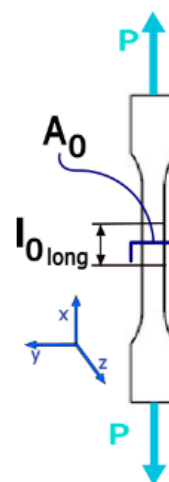


Figura 5.16 Esquema de l'assaig a tracció

Es fixa la velocitat a 5 mm/min i s'inicia l'assaig, recollint les dades d'ambdós extensòmetres i les relatives a la força aplicada per la màquina.



L'assaig finalitza quan la proveta trenca, com es veu a la Figura 5.19. Finalment, es treu la proveta de les mordasses i es repeteix tot el procediment per a la resta de provetes.



Figura 5.17 Mordasses

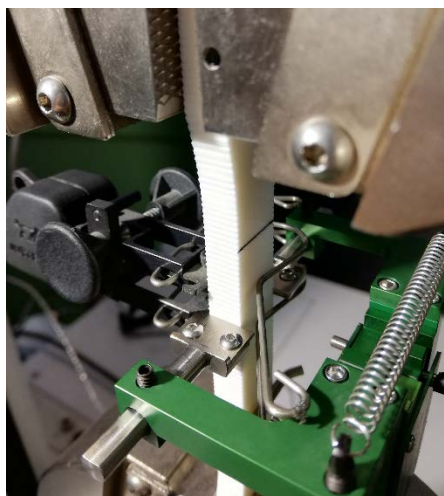


Figura 5.18 Extensòmetres

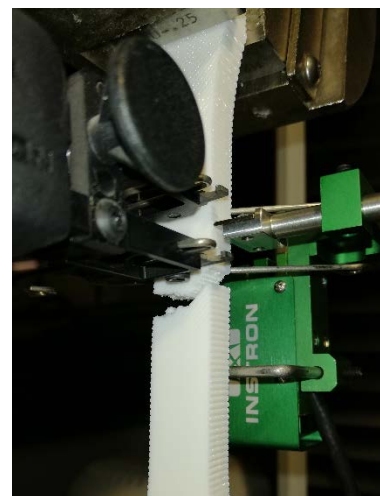


Figura 5.19 Proveta trencada

#### 5.2.1.1. Gràfic tensió-deformació

El primer pas és l'exportació de les dades enregistrades. Per a obtenir els valors de deformació, es divideix el desplaçament mesurat per l'extensòmetre longitudinal per la longitud inicial d'aquest (10 mm). D'altra banda, es divideix la força aplicada per l'àrea inicial de la secció central mesurada per a cada proveta. Així doncs, per a cada parella de valors de força (N) i desplaçament (mm) s'utilitzen l'Equació 5.1 i l'Equació 5.2 i s'obté un gràfic per a cada proveta, recollits a la Figura 5.20.

*Equació 5.1 Càlcul de la tensió*

$$\sigma_x = \frac{Px}{A_0}$$

*Equació 5.2 Càlcul de la deformació*

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L_{long}}{L_{0long}}$$

Per a cada proveta, s'han fet els càlculs utilitzant les mesures reals pròpies i no les nominals. A la Figura 5.20 està representat el model tridimensional de les provetes a tracció, així com una imatge del resultat al final de l'assaig, després de trencar. Per a tots els càlculs numèrics de les propietats, es calcularà la desviació s seguint l'Equació 5.3 on n és el número de mostres.

*Equació 5.3 Càlcul de la desviació*

$$S = \sqrt{\frac{(\sum x^2 - \tilde{x}^2)}{n - 1}}$$

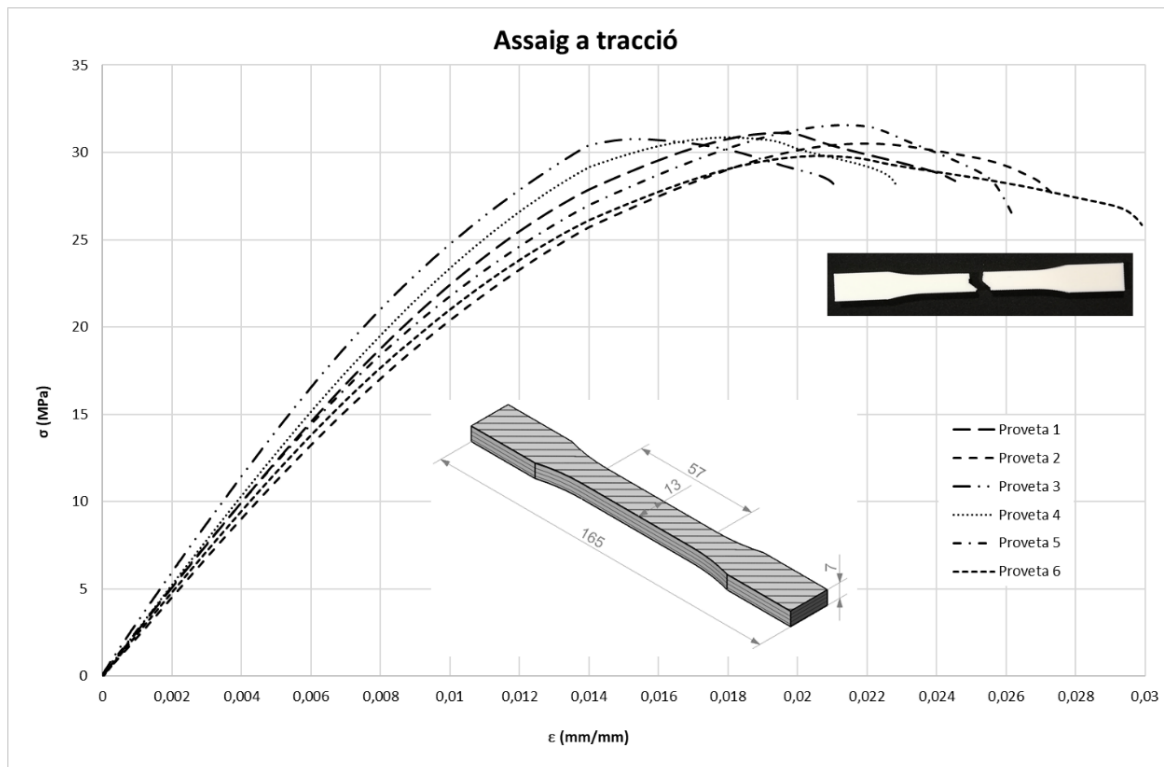


Figura 5.20 Gràfic tensió-deformació de l'assaig a tracció (mesures en mm)

#### 5.2.1.2. Mòdul elàstic longitudinal (Young)

Per a calcular el mòdul elàstic, emprant la llei de Hooke, es representa el tram inicial lineal de la corba calculada anteriorment. A continuació, es fa la recta de regressió d'aquest tram i es pren el pendent d'aquest com a valor de mòdul elàstic, tal i com es mostra a la Figura 5.21, que correspon a la proveta 4. A la Taula 5.2 es representen els valors obtinguts per a cada proveta. Com s'observa, el valor mitjà obtingut és d'aproximadament 2390 MPa.

Taula 5.2 Valors de mòdul elàstic per a les provetes a tracció

| Proveta   | E (MPa)        |
|-----------|----------------|
| 1         | 2200,7         |
| 2         | 2063,6         |
| 3         | 2776,4         |
| 4         | 2551,5         |
| 5         | 2394,0         |
| 6         | 2346,7         |
| Mitjana   | <b>2388,82</b> |
| Desviació | 252,84         |



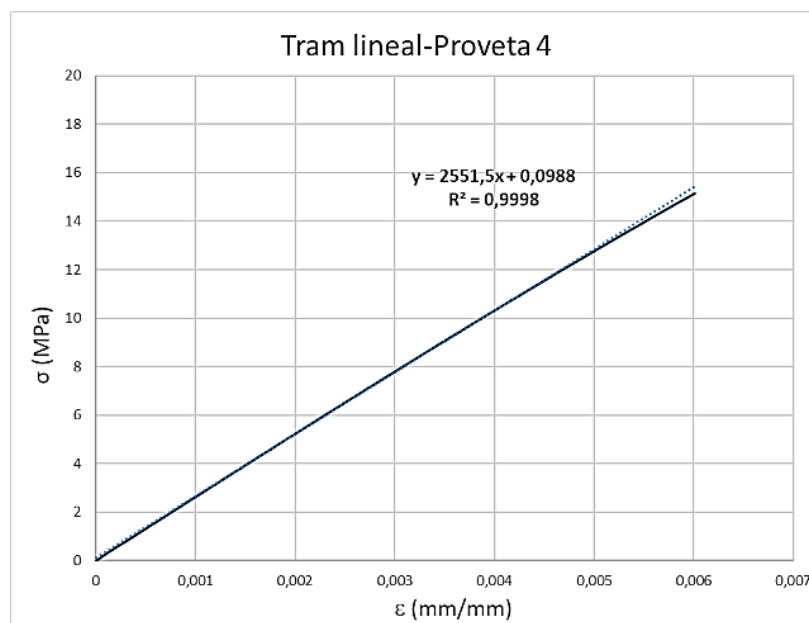


Figura 5.21 Recta de regressió del tram lineal del gràfic tensió-deformació

### 5.2.1.3. Coeficient de Poisson

El coeficient de Poisson es calcula a partir de les dades d'ambdós extensòmetres utilitzats i emprant l'. Es representen les deformacions axial i transversal en un gràfic en funció de la càrrega aplicada en N, com s'exemplifica a la Figura 5.22. Seguidament, es calculen els pendents d'aquestes dues rectes i es calcula el coeficient de Poisson dividint aquests dos valors entre sí. En l'exemple de la Figura 5.22, s'obté un coeficient de Poisson de 0,38.

Només es van realitzar les mesures amb l'extensòmetre transversal per a tres de les sis provetes, ja que l'adquisició d'aquest aparell va coincidir amb el moment dels assaigs i els tres primers ja s'havien realitzat. Els valors obtinguts han estat: 0,38, 0,37 i 0,36.

Equació 5.4 Càlcul del coeficient de Poisson

$$\nu = -\frac{\epsilon_{TRANS}}{\epsilon_{LONG}} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$

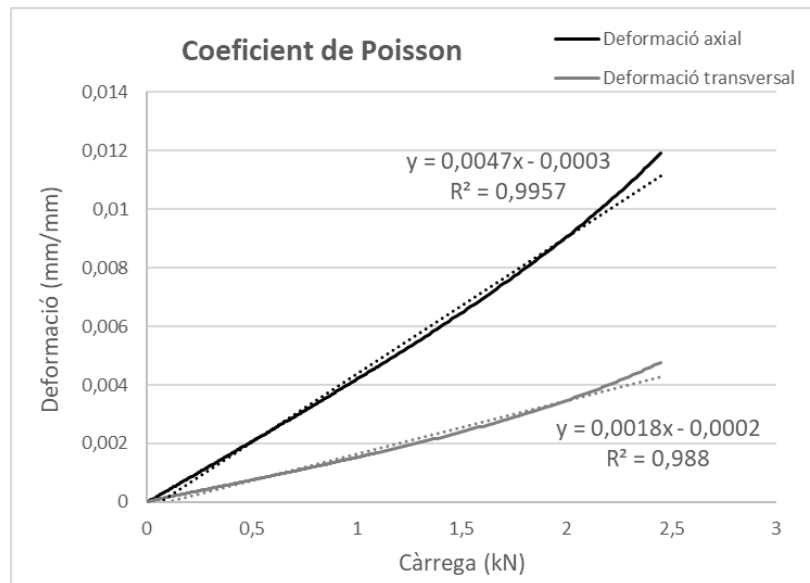


Figura 5.22 Gràfic per al càlcul del coeficient de Poisson

#### 5.2.1.4. Resistència a tracció

A partir del gràfic tensió-deformació s'extreu la resistència a tracció, que seguint la normativa correspon al valor de tensió  $\sigma_x$  màxima. Aquests valors es recullen a la Taula 5.3.

#### 5.2.1.5. Elongació

Es mesura la deformació  $\epsilon_x$  que correspon al valor de resistència a tracció. A la Taula 5.3 es poden veure aquests valors, juntament amb els valors de la resistència a tracció.

Taula 5.3 Valors d'elongació  $\epsilon$  i resistència a tracció  $\sigma$  per a les provetes a tracció

| Proveta   | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|-----------|----------------|--------------------|
| 1         | 31,134         | 0,0195             |
| 2         | 30,521         | 0,0219             |
| 3         | 30,779         | 0,0153             |
| 4         | 30,844         | 0,0180             |
| 5         | 31,551         | 0,0213             |
| 6         | 29,815         | 0,0206             |
| Mitjana   | <b>30,774</b>  | <b>0,0195</b>      |
| Desviació | 0,59           | 0,002              |

### 5.2.1.6. Fallada de les provetes

Totes les provetes d'aquest assaig van trencar per la zona central de manera fràgil. La Figura 5.23 correspon a la proveta 3 i s'aprecia que la fractura té una part a  $45^\circ$ , que es corresponen amb l'angle de raster, i una altra part perpendicular a la direcció d'aplicació de la força. La Figura 5.24 mostra el detall de la secció per la que ha trencat la proveta.

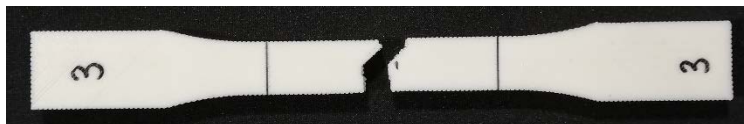


Figura 5.23 Probeta 3 trencada després de l'assaig a tracció

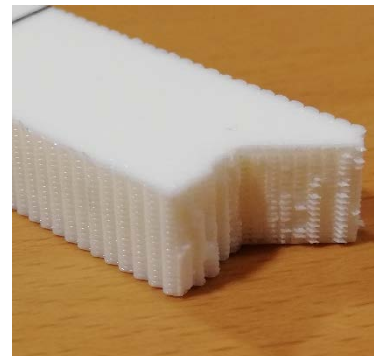


Figura 5.24 Detall de la secció de ruptura de la proveta 3 després de l'assaig a tracció

### 5.2.1.7. Discussió de resultats dels assaigs de tracció

Els resultats obtinguts han estat força consistents: la desviació estàndard en mòdul elàstic és d'un 10% aproximadament (acceptable tractant-se d'un gràfic no completament lineal) i els resultats dels coeficients de Poisson, resistència i elongació tenen molt poca variabilitat. Totes les provetes han trencat per la canya, a la zona intermitja.

## 5.2.2. COMPRESSIÓ

Hi ha 4 tipus de provetes per assajar a compressió. A la Figura 5.25 s'hi pot veure l'esquema genèric de l'assaig, tot indicant els eixos utilitzats per a l'estudi posterior.

Seguint la normativa D 695 (15) per a assaigs de compressió, es fixa la velocitat d'assaig a 1,3 mm/min per a les provetes curtes (2a i 2D) i a 2,6 mm/min per a les provetes llargues (4a i 4D), per tal de mantenir la mateixa velocitat de deformació. Una vegada col·locada la proveta, comprovant que queda alineada al centre i té les superfícies paral·leles, s'inicia l'assaig (Figura 5.26). En el cas de les provetes curtes, es decideix finalitzar l'assaig després de superar el límit elàstic i quan es considera



Figura 5.26 Assaig a compressió (probeta 4D)

que ja no s'aporta més informació. No obstant, per les 3 primeres (1, 2 i 3) de les provetes curtes, tant de secció quadrada com circular, es decideix continuar assajant fins arribar al límit permès per la màquina. Per a totes les provetes llargues també es finalitza l'assaig quan s'arriba a aquest límit.

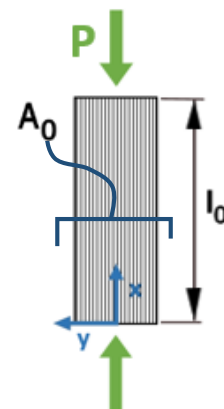


Figura 5.25 Esquema de l'assaig a compressió

En els gràfics i càlculs que segueixen a continuació s'han eliminat les dades recollides al final de l'assaig a les provetes curtes que es van

portar al límit, ja que es va observar que la resistència augmentava en el rang plàstic. A conseqüència de la compressió, es produïen transformacions en el material en reduir-se les porositats a l'infil, augmentant la densitat del material. Per aquest motiu, l'estructura canviava i la capacitat de càrrega era superior. Per tant, no aporten informació per a les comparacions que es faran entre els diferents grups de provetes a compressió o entre els diferents esforços. A la Figura 5.27 i a la Figura 5.28, es mostra el gràfic tensió-deformació que s'obté si s'afegeix tota la informació recopilada.

Seguidament, es fan els càlculs necessaris amb les dades enregistrades. Es mostraran els gràfics i resultats agrupats en els quatre tipus de provetes a compressió assajades.

#### 5.2.2.1. Gràfic tensió-deformació

De la mateixa manera que s'ha fet amb l'assaig a tracció, cal tractar les dades enregistrades per obtenir el gràfic tensió-deformació. Per obtenir els valors de deformació, es divideixen els valors enregistrats per la longitud inicial de cada proveta, mesurada anteriorment. Els valors de tensió s'obtenen dividint la força aplicada per la màquina per la secció mesurada inicialment. La formulació és anàloga a la de l'assaig a tracció.

S'obté un gràfic per a cada proveta, però cal ajustar-lo abans de visualitzar els resultats finals. Això es deu a que a l'inici del gràfic hi ha una zona no lineal deguda a que la peça s'ha d'adaptar a les plaques d'acer que apliquen la compressió (Figura 5.30). Seguint la normativa, es fa aquesta compensació (*Toe compensation*). En primer lloc, s'agafa el tram lineal posterior a aquesta zona inicial. Després es calcula el punt de tall de la recta de regressió obtinguda, i es fixa aquest valor de deformació a 0, movent el gràfic a l'esquerra (Figura 5.29). S'estudien els gràfics com si el tram inicial pertanyés a la recta de regressió trobada, per aquest motiu en

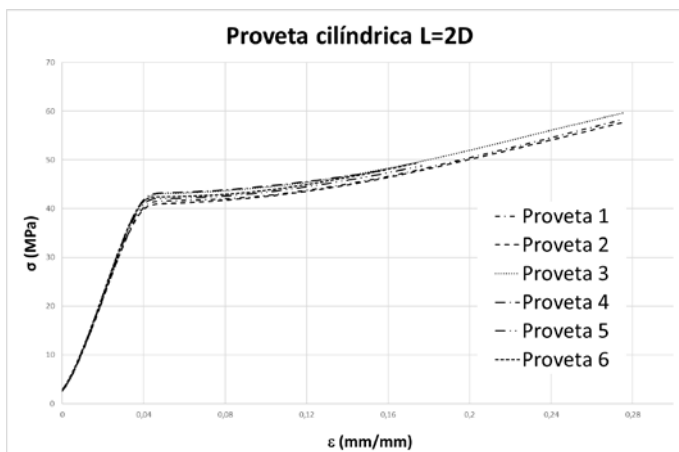


Figura 5.27 Tensió-deformació 2D portant 1, 2 i 3 al límit

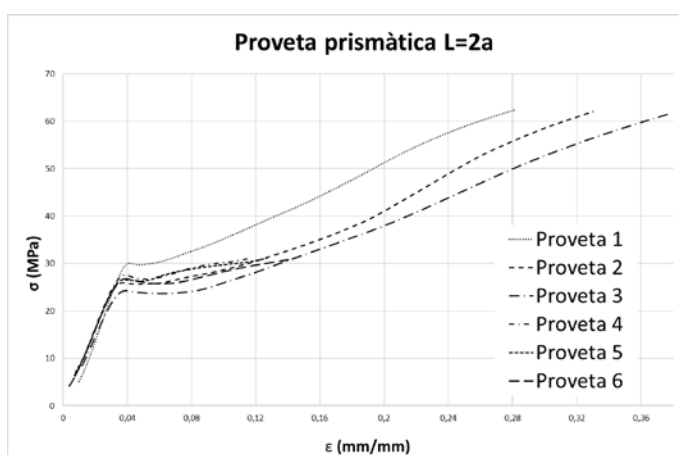


Figura 5.28 Tensió-deformació 2a portant 1, 2 i 3 al límit

els gràfics que hi ha de compressió el tram inicial no apareix.

Una vegada feta la correcció, s'agrupen els gràfics segons els 4 tipus de provetes de compressió, tal i com es veu de la Figura 5.31 a la Figura 5.34.

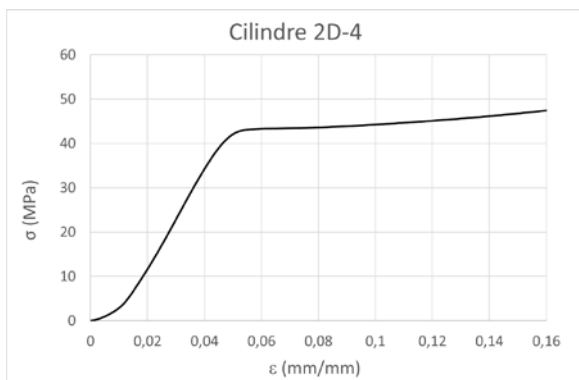


Figura 5.29 Gràfic abans de corregir

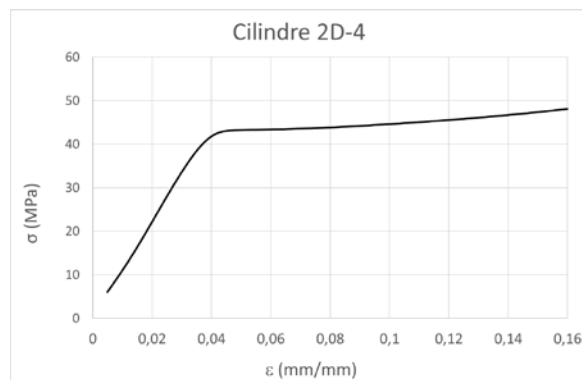


Figura 5.30 Gràfic després de corregir

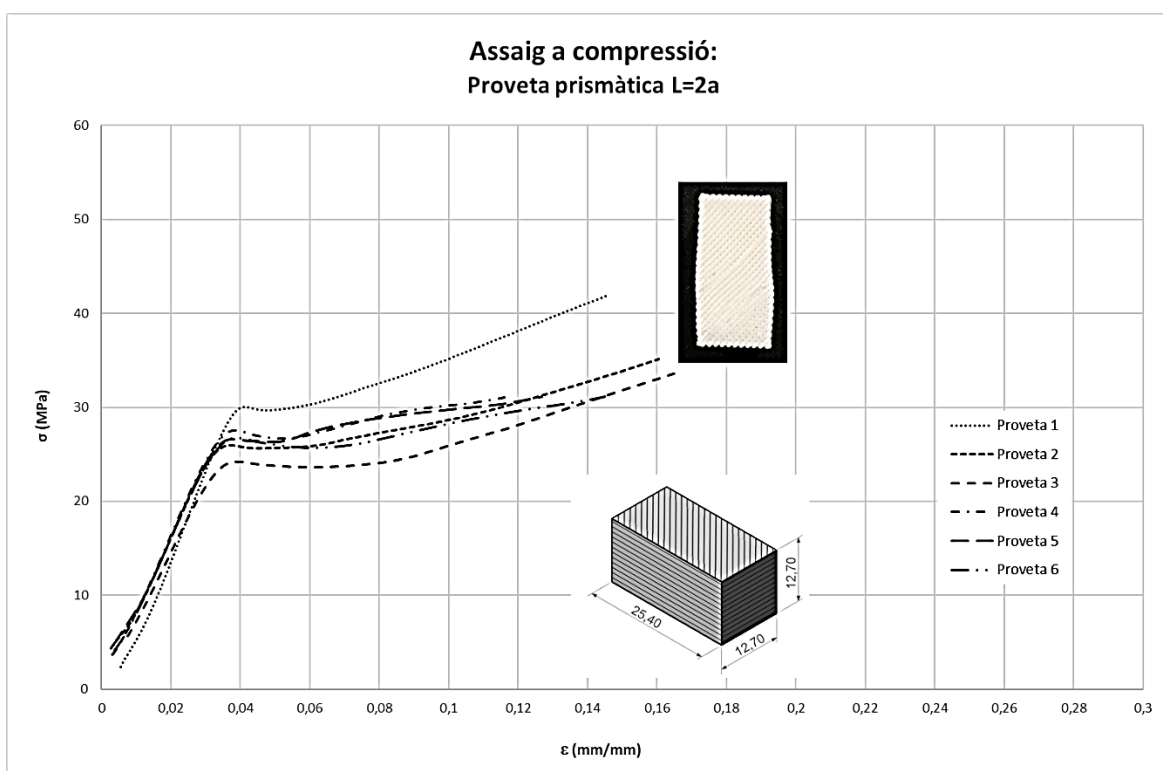


Figura 5.31 Gràfic tensió-deformació de l'assaig a compressió de provetes prismàtiques curtes (mesures en mm)

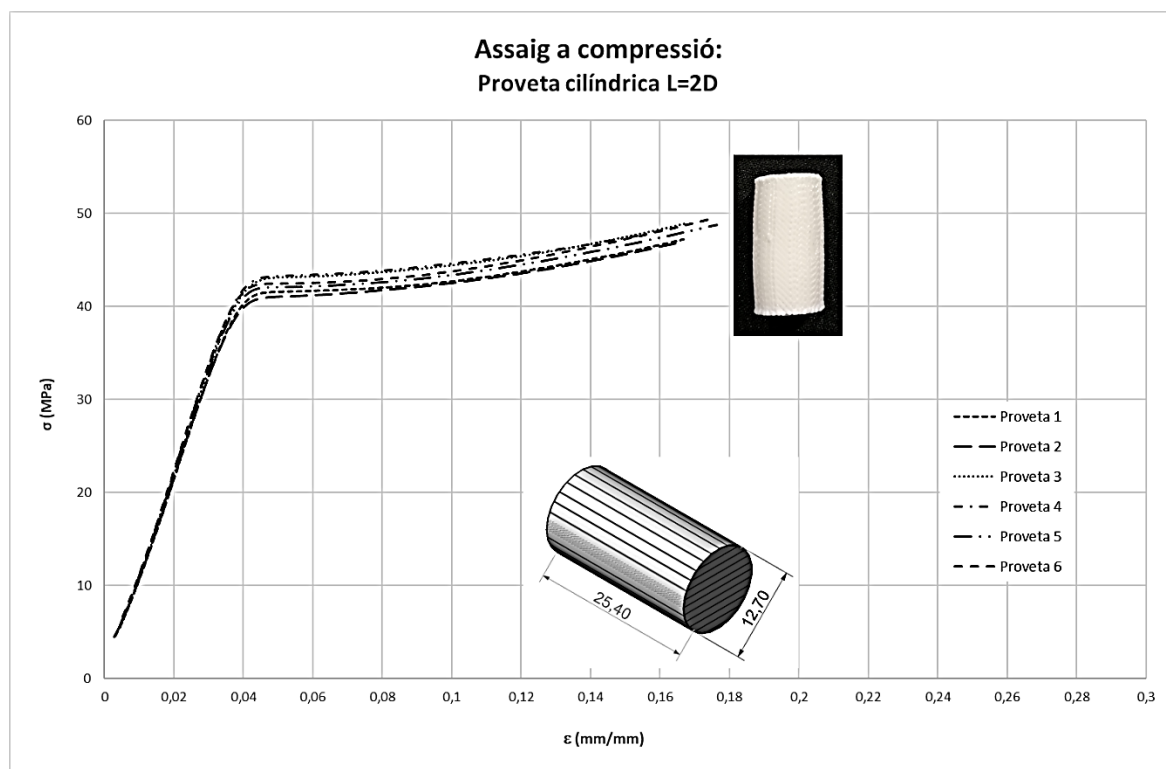


Figura 5.32 Gràfic tensió-deformació de l'assaig a compressió de provetes cilíndriques curtes (mesures en mm)

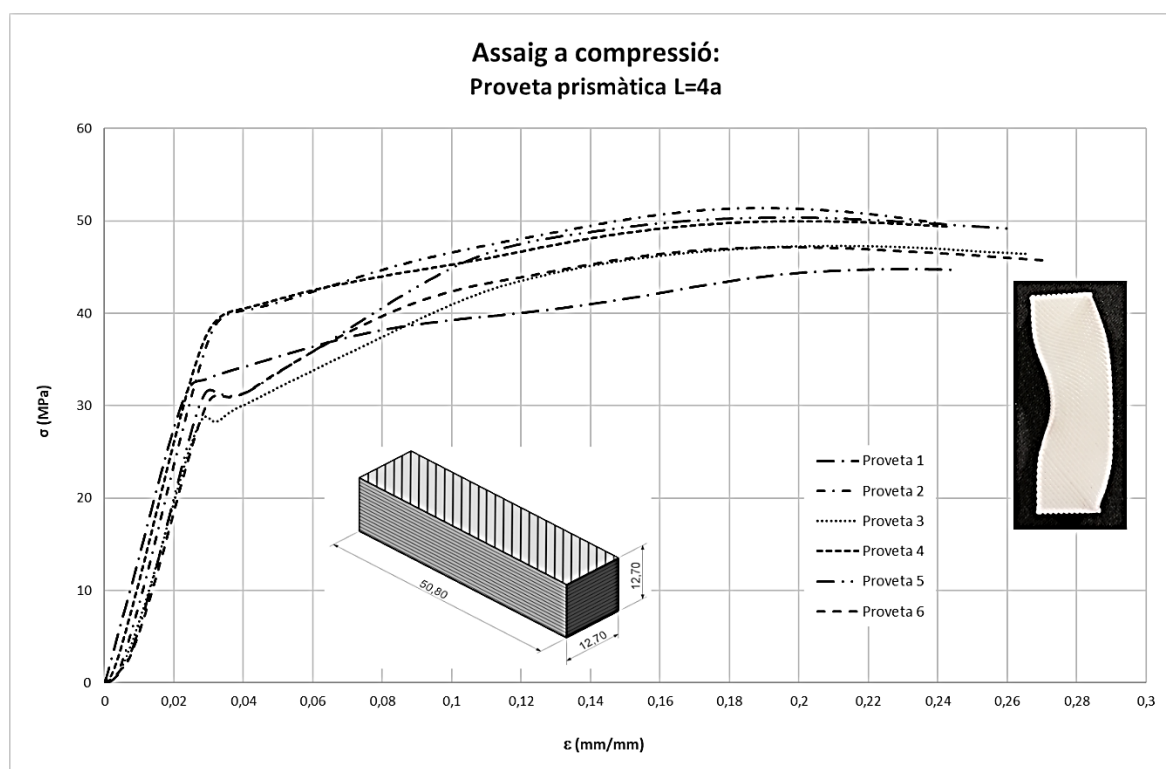


Figura 5.33 Gràfic tensió-deformació de l'assaig a compressió de provetes prismàtiques llargues (mesures en mm)

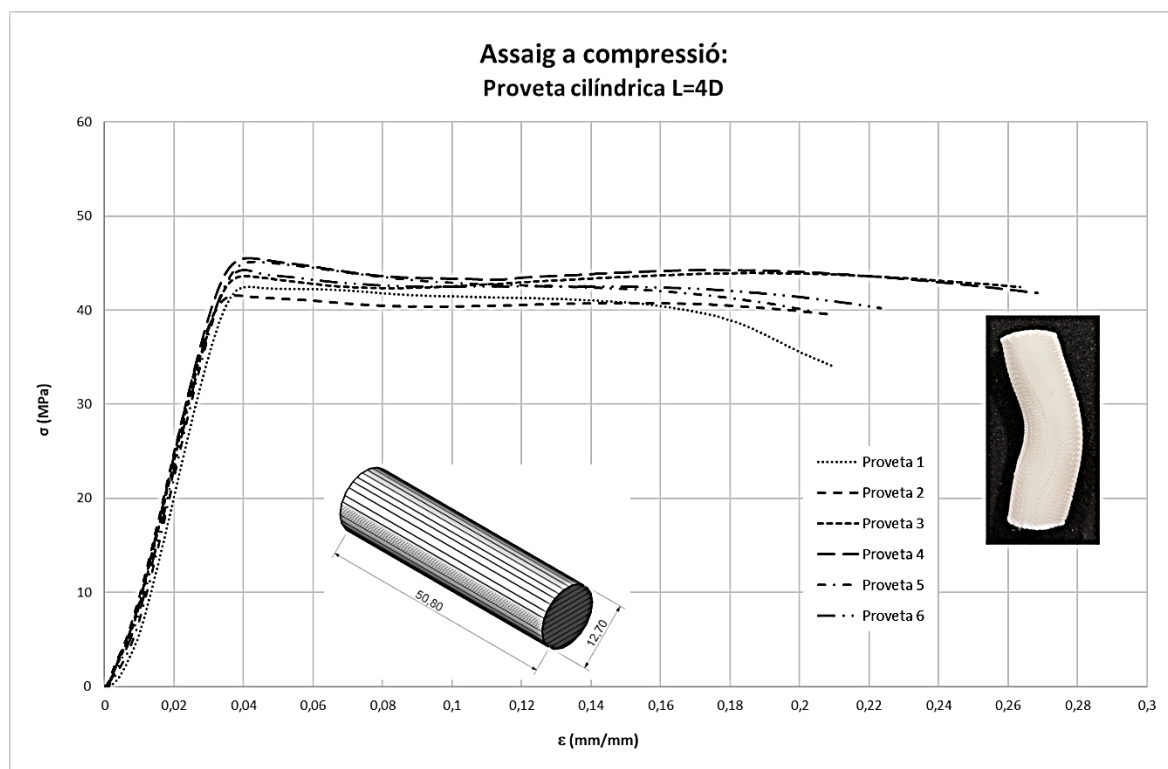


Figura 5.34 Gràfic tensió-deformació de l'assaig a compressió de provetes cilíndriques llargues (mesures en mm)

### 5.2.2.2. Mòdul elàstic longitudinal (Young)

Una vegada obtinguts els gràfics i seguint el mateix procediment que per les provetes a tracció, es calcula la recta de regressió del tram lineal de cada proveta, el pendent de la qual correspon al mòdul elàstic. La Taula 5.4 mostra els resultats obtinguts per a les 24 provetes de compressió, agrupades de 6 en 6 segons els 4 tipus de mostres assajades.

Taula 5.4 Valors de mòdul elàstic per a les provetes a compressió

|           | Prismàtiques<br>curtes - 2a | Cilíndriques<br>curtes - 2D | Prismàtiques<br>llargues - 4a | Cilíndriques<br>llargues - 4D |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Proveta   | E (MPa)                     | E (MPa)                     | E (MPa)                       | E (MPa)                       |
| 1         | 921,16                      | 1076,1                      | 1397,7                        | 1472,4                        |
| 2         | 799,62                      | 1077,6                      | 1458,4                        | 1463,8                        |
| 3         | 724,21                      | 1099,2                      | 1251,7                        | 1516,2                        |
| 4         | 816,42                      | 1113,5                      | 1453,0                        | 1563,0                        |
| 5         | 802,69                      | 1097,6                      | 1355,3                        | 1564,5                        |
| 6         | 802,43                      | 1123,3                      | 1304,9                        | 1549,4                        |
| Mitjana   | <b>811,09</b>               | <b>1097,88</b>              | <b>1370,17</b>                | <b>1521,55</b>                |
| Desviació | 63,20                       | 18,86                       | 82,36                         | 44,98                         |

### 5.2.2.3. Resistència a compressió

Seguint la normativa, la resistència a compressió correspon a la tensió  $\sigma_x$  a partir de la qual un augment en la deformació no suposa un augment en la tensió. Es recullen tots els resultats a la Taula 5.5.

Taula 5.5 Valors de resistència a compressió  $\sigma$  per a les provetes a compressió

|           | Prismàtiques<br>curtes - 2a | Cilíndriques<br>curtes - 2D | Prismàtiques<br>llargues - 4a | Cilíndriques<br>llargues - 4D |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Proveta   | $\sigma$ (MPa)              | $\sigma$ (MPa)              | $\sigma$ (MPa)                | $\sigma$ (MPa)                |
| 1         | 30,06                       | 41,17                       | 32,57                         | 42,49                         |
| 2         | 25,97                       | 40,66                       | 39,79                         | 41,56                         |
| 3         | 24,25                       | 42,58                       | 28,83                         | 43,64                         |
| 4         | 27,57                       | 42,82                       | 40,10                         | 45,52                         |
| 5         | 26,58                       | 41,78                       | 31,71                         | 45,14                         |
| 6         | 26,79                       | 42,13                       | 31,10                         | 44,27                         |
| Mitjana   | <b>26,87</b>                | <b>41,86</b>                | <b>34,02</b>                  | <b>43,77</b>                  |
| Desviació | 1,92                        | 0,83                        | 4,76                          | 1,53                          |

### 5.2.2.4. Elongació

Es mesura també l'elongació  $\epsilon_x$  corresponent a la resistència a compressió. Els valors es poden veure a la Taula 5.6.

Taula 5.6 Valors d'elongació  $\epsilon$  corresponent a la resistència a compressió de les provetes a compressió

|           | Prismàtiques<br>curtes - 2a | Cilíndriques<br>curtes - 2D | Prismàtiques<br>llargues - 4a | Cilíndriques<br>llargues - 4D |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Proveta   | $\epsilon$ (mm/mm)          | $\epsilon$ (mm/mm)          | $\epsilon$ (mm/mm)            | $\epsilon$ (mm/mm)            |
| 1         | 0,041                       | 0,043                       | 0,026                         | 0,042                         |
| 2         | 0,039                       | 0,043                       | 0,035                         | 0,038                         |
| 3         | 0,039                       | 0,044                       | 0,029                         | 0,041                         |
| 4         | 0,038                       | 0,043                       | 0,036                         | 0,042                         |
| 5         | 0,038                       | 0,043                       | 0,031                         | 0,043                         |
| 6         | 0,039                       | 0,042                       | 0,032                         | 0,033                         |
| Mitjana   | <b>0,039</b>                | <b>0,043</b>                | <b>0,031</b>                  | <b>0,040</b>                  |
| Desviació | 0,001                       | 0,000                       | 0,004                         | 0,004                         |



#### 5.2.2.5. Fallada de les provetes

La deformació final de les provetes depèn de la longitud i la forma, així que a les figures següents es presenta un exemple de cadascuna de les provetes.

Cal destacar que per a les provetes curtes, com ja s'ha mencionat abans, es va fer l'assaig fins a una deformació més alta per a les 3 primeres, tal i com es pot veure a la Figura 5.35, hi ha una diferència en la forma final de les provetes depenent del nivell de deformació al qual s'ha arribat.



*Figura 5.35 Diferència entre una proveta amb diferent nivell de deformació*

Per a les provetes curtes i a nivells de deformació elevats, s'observa que, tant a les de secció quadrada com a les de secció circular, les provetes presenten una forma de barril, sent això més visible a les cilíndriques. D'altra banda, a les provetes llargues es pot observar que han fallat per vinclament al final de l'assaig.



*Figura 5.36 Provena 2a final deformada*



*Figura 5.37 Provena 2D final deformada*



*Figura 5.38 Provena 4a final deformada*



*Figura 5.39 Provena 4D final deformada*

#### 5.2.2.6. Discussió de resultats dels assaigs de compressió

Els resultats obtinguts també són força consistents. Les desviacions van des d'un 8% com a màxim en mòdul elàstic fins a un 13-14% com a màxim en elongació i resistència, observant-se molt poca variabilitat en les cilíndriques.

Cal destacar que les provetes cilíndriques donen valors de resistència i rigidesa superiors a les prismàtiques, possiblement degut al procés de fabricació (un factor pot ser la posició i subjecció de la proveta mentre s'està imprimint).

Concloem que les provetes de secció circular donen uns resultats més fiables, i que la longitud llarga dona una rigidesa superior, amb millor correlació amb els resultats de referència. El fet que la proveta llarga falli per vinclament al final de l'assaig no és cap problema, ja que

aquestes propietats mecàniques es determinen en el rang elàstic del material, quan les deformacions són petites en comparació a les corresponents a estats de deformació avançats.

### 5.2.3. FLEXIÓ

Per últim, es procedeix a fer l'assaig a flexió de tres punts tal i com es descriu a la normativa D 790 (16). L'esquema d'aquest assaig i la disposició dels suports es pot veure a la Figura 5.40.

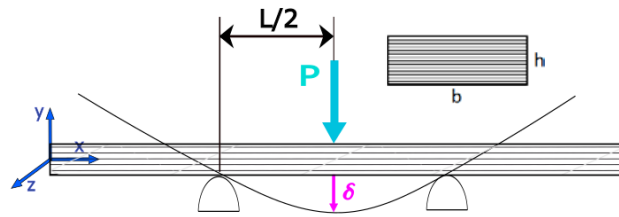


Figura 5.40 Esquema de l'assaig de flexió

La proveta fa 127 mm de longitud, mentre que la distància entre els dos suports és de només 52 mm. Això es deu a que es preveu que la proveta pateixi grans deformacions i cal que tingui sobrant als extrems per no perdre el contacte amb els suports.

En primer lloc, es col·loca la proveta als suports deixant una separació entre suports (L) de 52 mm i assegurant-se de que està centrada i alineada amb el capçal superior, tal i com es mostra a la Figura 5.41. Es fixa la velocitat del capçal superior a 1,4 mm/min, a partir de la fórmula extreta de la normativa corresponent a la Equació 5.5.

Equació 5.5

$$R = \frac{z \cdot L^2}{6 \cdot h} = \frac{0,01 \cdot 52^2}{6 \cdot 3,2} \approx 1,4 \text{ mm/min}$$

On:

R= velocitat del capçal (mm/min)

L= distància entre suports (mm)

h= profunditat de la proveta (mm)

z= velocitat d'elongació de la part inferior de la proveta, ha de ser  $z=0,01 \text{ mm/mm/min}$

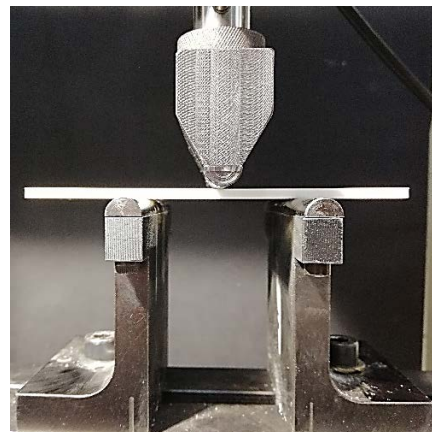


Figura 5.41 Disposició de la proveta per l'assaig a flexió

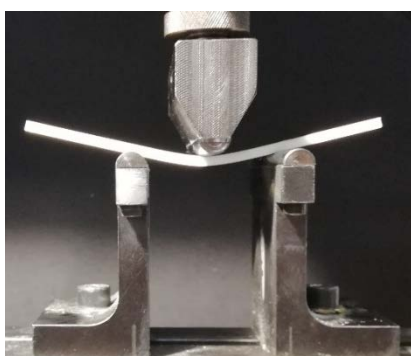


Figura 5.42 Assaig a flexió

Una vegada fixats els paràmetres, s'inicia l'assaig seguint el procediment A, és a dir, que l'assaig finalitzarà quan la deformació arribi a un 5%, que equival a un desplaçament vertical de 7 mm. Per seguretat, es decideix registrar dades fins a un desplaçament de 8 mm. Igual que s'ha fet amb les provetes curtes a compressió, es decideix assajar una de les provetes més enllà del límit descrit anteriorment per observar el seu comportament, però no s'observa cap

informació rellevant, per tant s'ometen aquestes dades. Per aquest motiu la proveta 2 apareix a les fotografies posteriors amb una deformació més gran que la resta.

### 5.2.3.1. Gràfic tensió-deformació

A diferència dels assaigs anteriors, per calcular la tensió i l'elongació corresponent a cada parell de dades recollit, no es divideixen la força i el desplaçament per l'àrea i la longitud inicial, ja que no es tracta d'un esforç axial. Per calcular les tensions, partim de la fórmula de Navier i substituint els valors del moment flector i del moment resistent, s'arriba a l'Equació 5.6, que expressa les tensions normals en funció de la força P aplicada, la distància entre suports i les dimensions de la secció. Per a les deformacions, partint de la llei de Hooke, substituint l'expressió de la tensió de l'Equació 5.6 i el mòdul elàstic aïllat de l'expressió anterior (Equació 5.7). Així doncs, s'obté l'expressió de l'Equació 5.7, que dona les deformacions longitudinals en funció del desplaçament transversal delta (mesurat), l'alçada h de la secció i la distància L entre suports.

*Equació 5.6 Càlcul de la tensió per l'assaig a flexió*

$$\sigma_x = \frac{M_z}{W_z} = \frac{P \cdot L/4}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} = \sigma_x$$

*Equació 5.7 Càlcul de la deformació per l'assaig a flexió*

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} = \frac{\frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}}{\frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I}} = \frac{3 \cdot P \cdot L \cdot 48 \cdot \delta \cdot I}{2 \cdot b \cdot h^2 \cdot P \cdot L^3} = \frac{6 \cdot \delta \cdot h}{L^2} = \varepsilon_f$$

Aquesta formulació és vàlida per a petites deformacions, com que en aquest assaig les arriben a valors de gran deformació, apareix una força normal  $N_x$ , degut a que, per a grans deformacions, s'ha de tenir en compte aquest efecte de segon ordre, que significa que les equacions d'equilibri es plantegen sobre la peça deformada, no amb la geometria inicial. Aquest comportament s'esquematitza a la Figura 5.43 i la Figura 5.44.

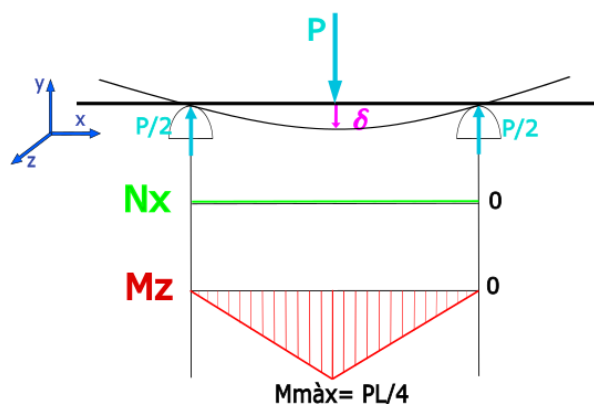


Figura 5.43 Flexió de tres punts per a petites deformacions

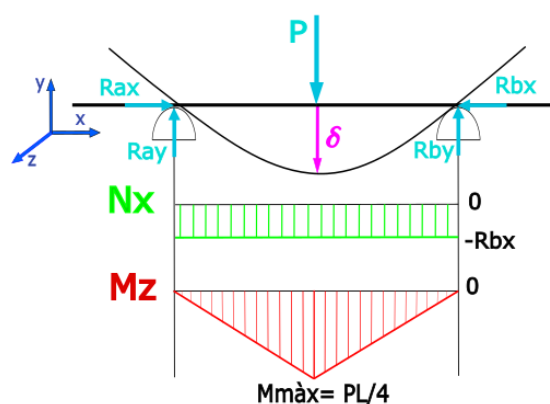


Figura 5.44 Flexió de tres punts per a grans deformacions

Per aquest motiu, a la secció central estudiada i per a grans deformacions, cal tenir en compte la contribució dels dos esforços, normal i flector, per a calcular les tensions normals en règim no lineal i grans deformacions. A la Figura 5.45 es mostren les distribucions de tensions a la secció per al moment flector  $M_z$  i l'esforç normal  $N_x$  i la tensió resultant obtinguda pel principi de superposició (Equació 5.8). Aquest comportament es veurà a la simulació amb elements finits que es durà a terme, on s'observarà que la distribució no és simètrica a partir de determinats nivells de deformació.

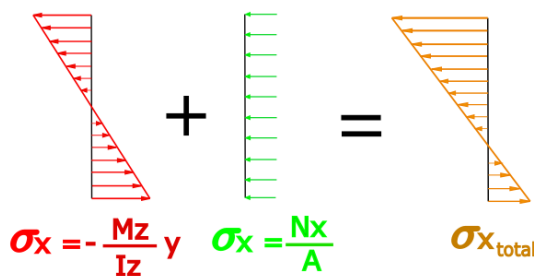


Figura 5.45 Distribució de tensions total pel principi de superposició

Equació 5.8 Principi de superposició

$$\sigma_x = \sigma_{x_{M_z}} + \sigma_{x_{N_x}} = -\frac{M_z}{I_z} \cdot y + \frac{N_x}{A}$$

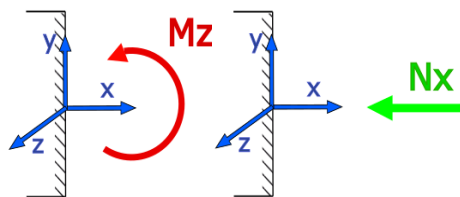


Figura 5.46 Esforços aplicats per a grans deformacions

Fent els càlculs necessaris partint de la força (P) i del desplaçament ( $\delta$ ) enregistrats, s'obté un gràfic per a cada proveta, recollits a la Figura 5.47.

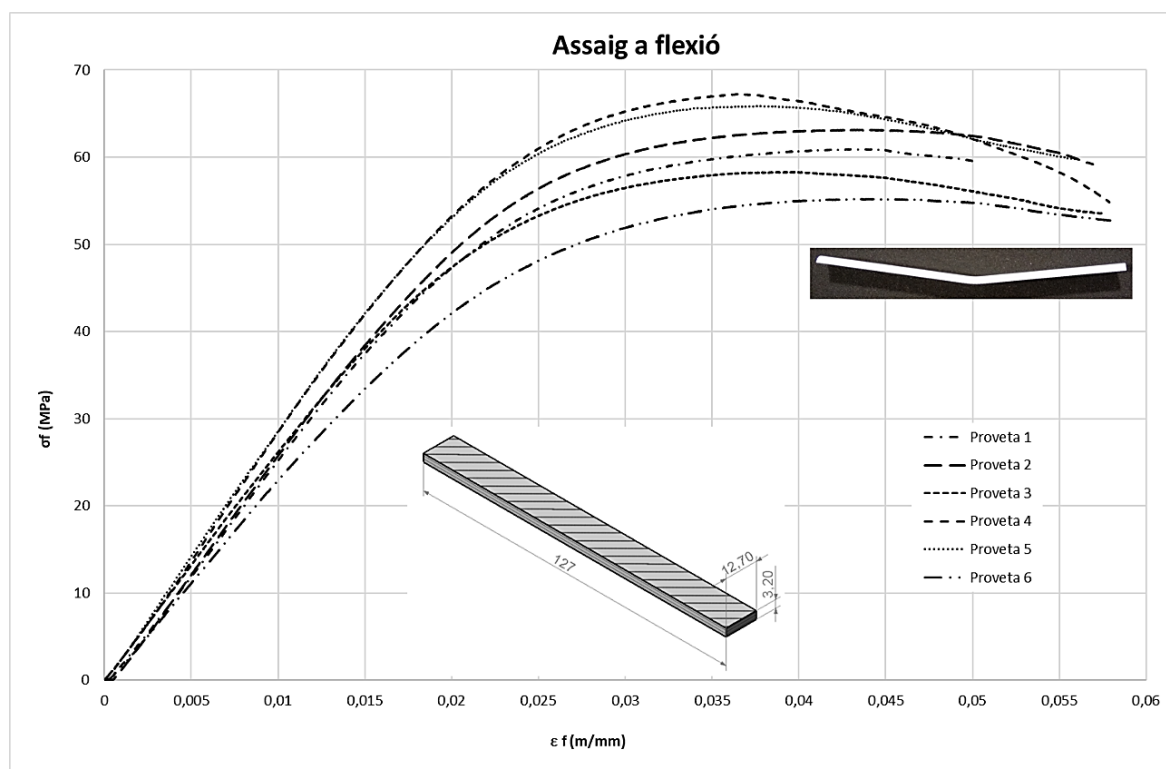


Figura 5.47 Gràfic tensió-deformació de l'assaig a flexió (mesures en mm)

### 5.2.3.2. Mòdul elàstic tangent

Seguint la normativa, es calcula el mòdul elàstic a flexió com:

*Equació 5.9 Mòdul elàstic a flexió*

$$E_b = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I}$$

Es construeix el gràfic força desplaçament per obtenir el pendent  $P/\delta$ , i s'obtenen els valors següents de mòdul elàstic per a totes les provetes, tal com es mostra a la Taula 5.7. El valor mitjà per al mòdul elàstic és d'aproximadament 2640 MPa.

*Taula 5.7 Valors de mòdul elàstic per a les provetes a flexió*

| Proveta   | E (MPa)        |
|-----------|----------------|
| 1         | 2602,96        |
| 2         | 2657,35        |
| 3         | 2572,09        |
| 4         | 2900,22        |
| 5         | 2859,03        |
| 6         | 2265,36        |
| Mitjana   | <b>2642,84</b> |
| Desviació | 229,03         |

### 5.2.3.3. Resistència a flexió

De la mateixa manera que s'ha fet per als assaigs anteriors, s'obté la resistència a flexió prenent el valor màxim de la tensió  $\sigma_f$ . Resultats recollits a la Taula 5.8.

### 5.2.3.4. Elongació

Es pren la deformació  $\epsilon_f$  que correspon a la tensió de resistència a flexió. Es mostren ambdós resultats a la Taula 5.8.

*Taula 5.8 Valors d'elongació  $\epsilon_f$  i resistència a flexió  $\sigma_f$*

| Proveta   | $\sigma_f$ (MPa) | $\epsilon_f$ (mm/mm) |
|-----------|------------------|----------------------|
| 1         | 60,92            | 0,042                |
| 2         | 63,19            | 0,043                |
| 3         | 58,34            | 0,039                |
| 4         | 67,26            | 0,036                |
| 5         | 65,87            | 0,036                |
| 6         | 55,22            | 0,043                |
| Mitjana   | <b>61,80</b>     | <b>0,040</b>         |
| Desviació | 4,57             | 0,003                |

### 5.2.3.5. Fallada de les provetes

Quan es finalitza l'assaig, les provetes estan deformades però no trencades. Com s'ha explicat prèviament, es va dur la proveta 2 a una deformació superior, fins al límit permès per la màquina. Per a la resta de provetes, la Figura 5.48 mostra la deformació final. La proveta deformada presenta una ròtula plàstica al centre.



Figura 5.48 Provetes 6 deformada al final de l'assaig a flexió

### 5.2.3.6. Discussió de resultats dels assaigs de flexió

Les desviacions en mòdul elàstic són inferiors al 9%, i al voltant del 7,5% les de resistència i elongació. S'observen corbes de tendència tensió-deformació semblants en les sis mostres assajades, i zones i formes de fallada idèntiques.

## 5.3. Comparació de resultats

Una vegada finalitzats tots els assaigs i càlculs posteriors per obtenir les propietats mecàniques, es procedeix a comparar els valors obtinguts segons l'aplicació dels diferents esforços.

En el cas de les provetes a compressió, on es tenen 4 resultats per a cada propietat mecànica, s'agafa el valor mitjà entre les provetes cilíndriques llargues i les provetes prismàtiques llargues. Això es deu a que, tal com diu la normativa, per calcular el valor del mòdul elàstic es recomana millor assajar les provetes llargues.

En primer lloc, la Taula 5.9 mostra un resum amb els valors de les 3 propietats per a cada assaig.

Taula 5.9 Taula resum de propietats mecànics per als 3 assaigs

|            | E (MPa) | $\sigma$ (MPa) | $\epsilon$ (mm/mm) |
|------------|---------|----------------|--------------------|
| Compressió | 1445,86 | 38,89          | 0,036              |
| Tracció    | 2388,82 | 30,77          | 0,019              |
| Flexió     | 2642,84 | 61,80          | 0,040              |

A continuació, es representen aquests resultats en forma de gràfics, separant-los en mòdul elàstic, resistència i deformació. Per a cadascuna d'aquestes propietats, es presenta un gràfic de barres i també un *Boxplot*, on es mostra la dispersió que hi ha dins de cada sèrie de valors.



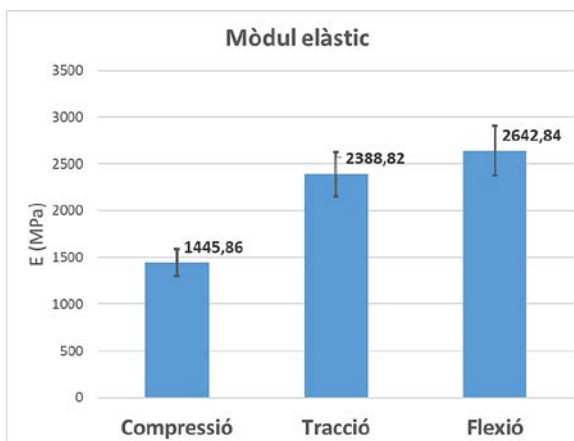


Figura 5.49 Gràfic de barres del mòdul elàstic

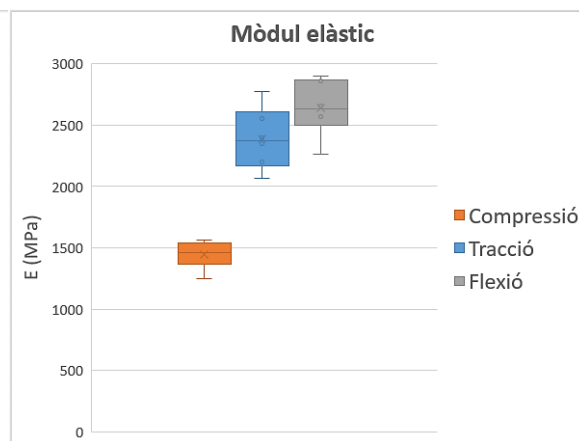


Figura 5.50 Boxplot del mòdul elàstic

Es pot apreciar que el mòdul elàstic més elevat és el de flexió, amb un valor de 2640 MPa, seguit del de tracció amb 2390 MPa. No és una diferència significativa, en canvi el valor del mòdul elàstic a compressió és de 1445 MPa, aproximadament un 40% més baix que els dos anteriors. Si s'estudia el *Boxplot*, s'observa clarament que les dades del mòdul elàstic a compressió presenten menys dispersió, mentre que les de tracció i flexió són prou similars. Val la pena comentar que, encara que el valor de E a compressió és una mitjana entre els dos tipus de provetes llargues, no hi ha gran discrepància entre les dues sèries.

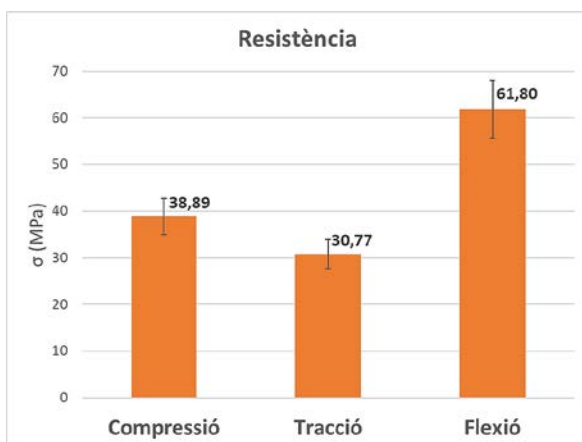


Figura 5.51 Gràfic de barres de la resistència

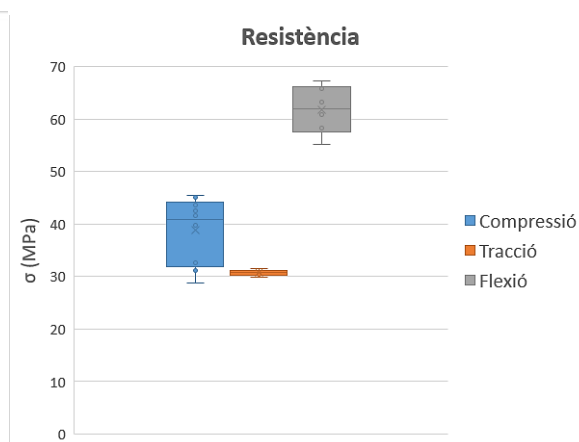


Figura 5.52 Boxplot de la resistència

El més destacable que s'observa als gràfics relatius a la resistència és que el valor a flexió és bastant superior als altres tipus d'assaig, un 60% més alt que la resistència a compressió i el doble que la resistència a tracció, que es veu clarament que és la més baixa. Si s'estudia el gràfic de bigotis es pot veure que els valors de resistència a tracció per a les diferents provetes presenten molt poca dispersió, mentre que les dades a compressió són les que mostren més variabilitat. Això es deu en part al fet que per a les provetes de compressió s'han agafat la mitjana dels valors de les provetes llargues amb secció circular i secció quadrada, i com es discutirà a l'apartat següent, aquestes sèries de valors presenten discrepàncies.

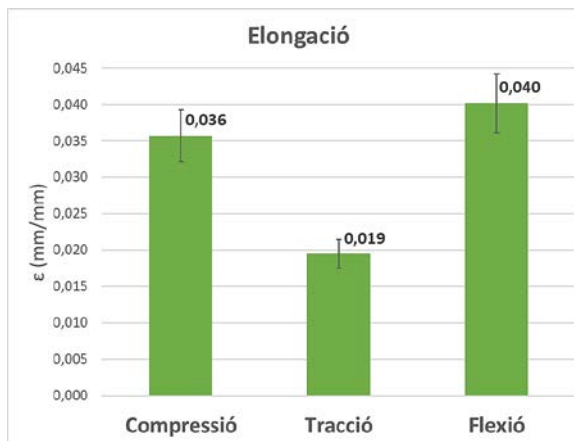


Figura 5.53 Gràfic de barres de l'elongació

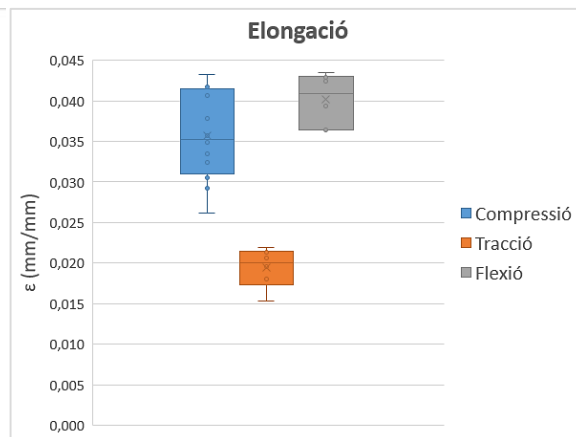


Figura 5.54 Boxplot de l'elongació

Finalment, es comparen els gràfics dels valors d'elongació corresponents a la resistència per a cada esforç. De la mateixa manera que abans, el valor més alt correspon a l'assaig de flexió, seguit del compressió, tot i que no presenten una diferència tan significativa. L'elongació per a l'assaig de tracció és la més baixa, així com la seva dispersió. En aquest cas, les dades de l'assaig a compressió també són les que presenten una variabilitat més alta, sent igualment vàlida l'explicació donada al paràgraf anterior.

Així doncs, a manera de resum, s'obtenen aquestes 3 relacions:

$$E_{flexió} \approx E_{tracció} \gg E_{compressió}$$

$$\sigma_{flexió} \gg \sigma_{compressió} > \sigma_{tracció}$$

$$\varepsilon_{flexió} \gtrsim \varepsilon_{compressió} \gg \varepsilon_{tracció}$$

### 5.3.1. Comparació de les provetes assajades a compressió

En primer lloc, es presenta una taula resum amb els valors obtinguts per a les 4 sèries de provetes.

Taula 5.10 Taula resum de les provetes a compressió

|             | E (MPa) | $\sigma$ | $\varepsilon$ |
|-------------|---------|----------|---------------|
| Prisma 2a   | 811     | 26,87    | 0,039         |
| Cilindre 2D | 1098    | 41,86    | 0,043         |
| Prisma 4a   | 1370    | 34,02    | 0,0315        |
| Cilindre 4D | 1522    | 43,77    | 0,040         |

A continuació es representen les dades en forma de gràfics.



Es pot observar que els valors de mòdul elàstic de les provetes llargues són bastant més elevats independentment de la forma de la secció. En el cas de les cilíndriques, les provetes

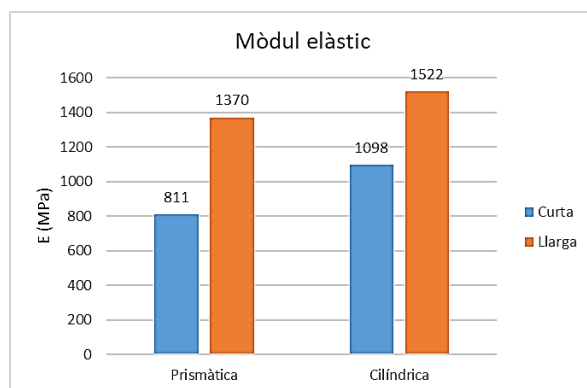


Figura 5.55 Comparació del mòdul elàstic a compressió

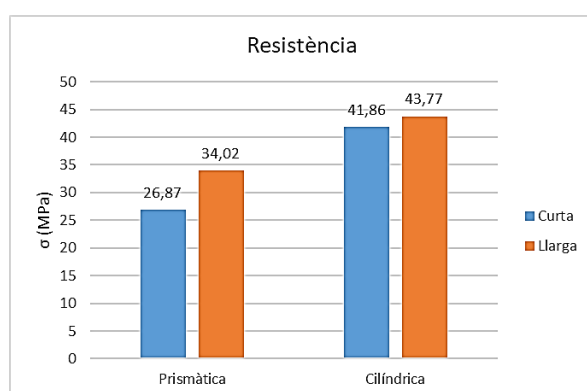


Figura 5.56 Comparació de la resistència a compressió

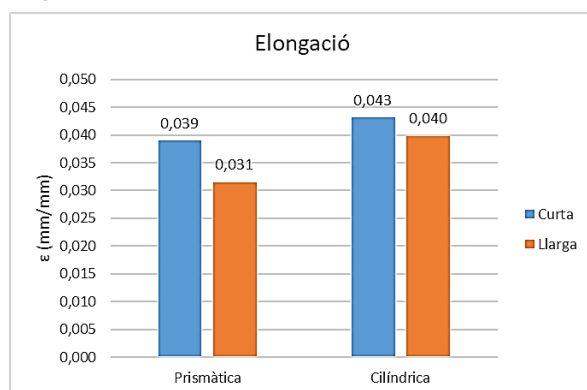


Figura 5.57 Comparació de l'elongació a compressió

llargues tenen un mòdul elàstic un 40% més alt, i en les prismàtiques un 70% més gran. D'altra banda, la secció circular també presenta un mòdul elàstic més elevat dins de cadascuna de les longituds. Així doncs el mòdul elàstic més alt és el de les provetes amb secció circular llargues.

Per als valors de resistència a compressió s'obtenen diferències semblants, ja que les provetes de secció circular presenten un valor més elevat de resistència, de la mateixa manera que les llargues tenen un valor superior a les curtes. No obstant, la diferència entre els valors en funció de la longitud de les provetes no és tan accentuada com per al mòdul elàstic.

Finalment, l'elongació obtinguda per a les provetes de secció circular també és lleugerament superior als valors de les de secció quadrada. En canvi, s'obtenen deformacions més altes per a les provetes curtes que per a les provetes llargues. De totes maneres, en el cas de l'elongació, les diferències són menys rellevants que en el cas del mòdul elàstic i la resistència. La qual cosa està en consonància amb la norma, que no prescriu provetes diferents (llargues) per determinar aquesta magnitud.

A continuació es presenten unes expressions resumint aquests resultats de la mateixa manera que a l'apartat anterior.

$$E_{cilíndrica} > E_{prismàtica} \text{ i } E_{llarga} \gg E_{curta}$$

$$\sigma_{cilíndrica} > \sigma_{prismàtica} \text{ i } \sigma_{llarga} \approx \sigma_{curta}$$

$$\epsilon_{cilíndrica} > \epsilon_{prismàtica} \text{ i } \epsilon_{llarga} < \epsilon_{curta}$$

## 6. Simulació per elements finits

La segona part experimental consisteix en simular mitjançant el mètode dels elements finits els assaigs realitzats per validar els resultats obtinguts i intentar identificar la influència de les formes de secció i longituds de les provetes a compressió. Per fer les simulacions per elements finits, s'ha utilitzat el software *ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 19.1 (17)*.

S'estudien les simulacions per elements finits agrupant-les en tracció, compressió i flexió, de la mateixa manera que als apartats anteriors. Per a totes aquestes sèries de provetes, s'utilitzen els valors nominals de les mesures de cada proveta per definir la geometria.

Es simulen les provetes com un material lineal, elàstic i isòtrop. No es simula la seva mesoestructura ni es té en compte el seu procés de fabricació. Per tant, les porositats de les peces i el seu infil no influeixen en els resultats obtinguts.

A la Figura 6.1 es mostra una imatge ampliada de la superfície d'una de les provetes on es veu la porositat i l'estructura interna que no s'han simulat.

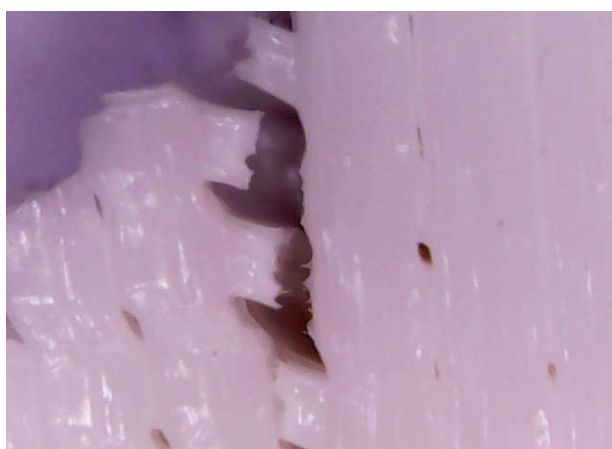


Figura 6.1 Ampliació de la superfície d'una proveta

En primer lloc, s'introdueix la geometria de la proveta i es fa el mallat. Aquest es realitza utilitzant l'element Plane183, que és un element bidimensional de vuit nodes. Es tria aquest tipus d'element perquè totes les simulacions es realitzaran imposant un comportament de tensió plana amb gruix o seran amb simetria de revolució, és a dir que només necessitem una representació bidimensional. Aquest element té plasticitat, hiperelasticitat, fluència, rigidesa, gran deflexió i grans capacitats de deformació. Per definir el mallat de cada peça, s'ha fixat el nombre d'elements a la longitud les cares en funció de les dimensions de cada proveta.

A continuació, s'introdueixen les propietats del material obtingudes a l'assaig experimental. A cada tipus de proveta s'utilitza el mòdul elàstic obtingut per aquesta. No obstant, s'introdueix en tots els casos el coeficient de Poisson trobat a partir de l'assaig a tracció (0,37), degut a que és l'únic valor del coeficient de Poisson trobat de manera experimental.

Per a totes les provetes, es duu a terme un anàlisi amb geometria no lineal. Ansys empra el mètode de Newton-Raphson com a procés iteratiu per arribar a un equilibri de forces a cada pas de càrrega que s'aplica.

Per a cada tipus de proveta, es duran a terme simulacions amb diferents valors de desplaçament per poder validar les corbes obtingudes als assaigs experimentals. Seguidament, s'estudiaran més en detall les distribucions de tensions i desplaçaments per a un valor del desplaçament concret.

## 6.1. Tracció

Per a les provetes a tracció, es defineix el material amb un mòdul elàstic longitudinal (Mòdul de Young) de 2390 MPa i un coeficient de Poisson de 0,37.

Es representa la geometria de la peça i es marquen els punts corresponents a la posició que ocupen les mordasses durant l'assaig, per tal de poder aplicar les condicions de contorn en aquesta posició. Així doncs, es fixen a zero els desplaçaments de la línia que representa la mordassa inferior i es van modificant els valors de desplaçament vertical que s'imposen a la línia de la mordassa superior.

La Figura 6.2 mostra la proveta deformada en aplicar un desplaçament corresponent a una elongació de 0,01 mm/mm. Seguidament, la Figura 6.3 i la Figura 6.4 representen, respectivament, els desplaçaments en la direcció x (longitudinal) i en la direcció y (transversal). El desplaçament vertical màxim es troba a la part superior de la proveta, mentre que la part inferior es manté amb un desplaçament nul, degut a les condicions de contorn imposades. D'altra banda, s'aprecia que el desplaçament transversal és nul a la l'eix vertical central i presenta una distribució prou simètrica al voltant d'aquest eix, obtenint valors de desplaçament negatius per al costat dret i positius per al costat esquerre. Aquests valors, juntament amb la imatge de la proveta deformada després de la simulació, confirmen que, en estirar la proveta aplicant la força vertical, la canya redueix la seva amplada.

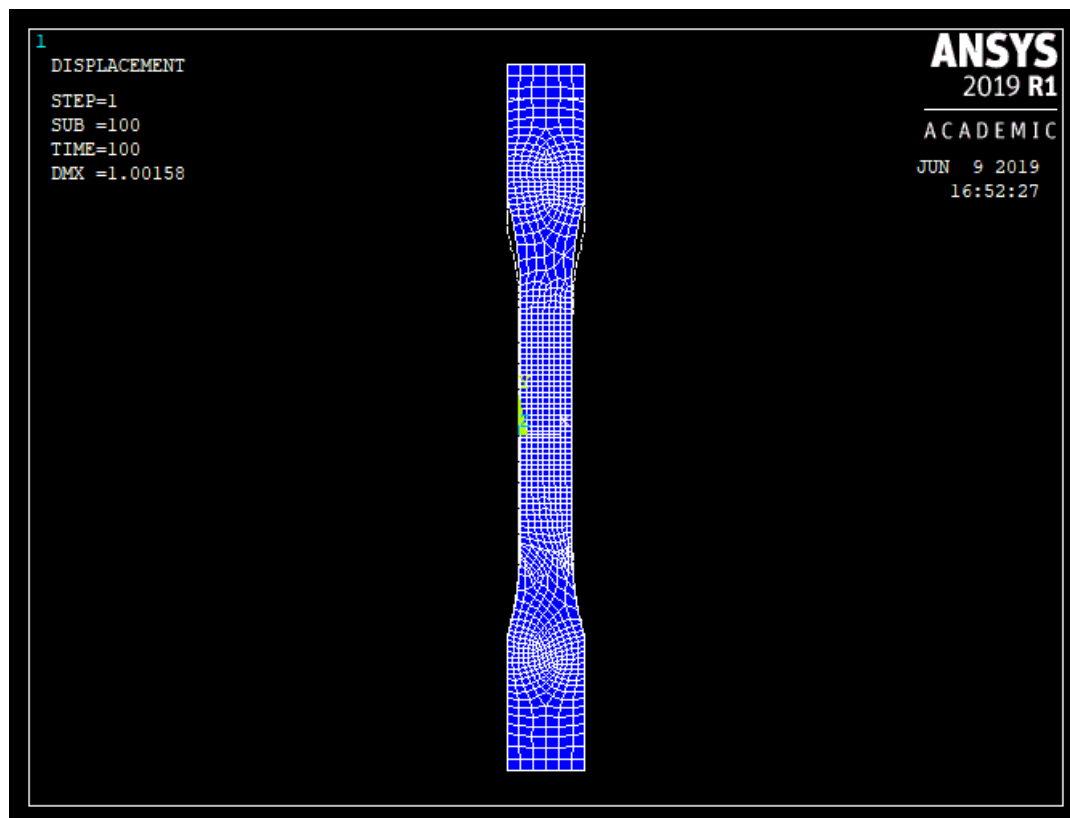


Figura 6.2 Proveta mallada de l'assaig a tracció deformada

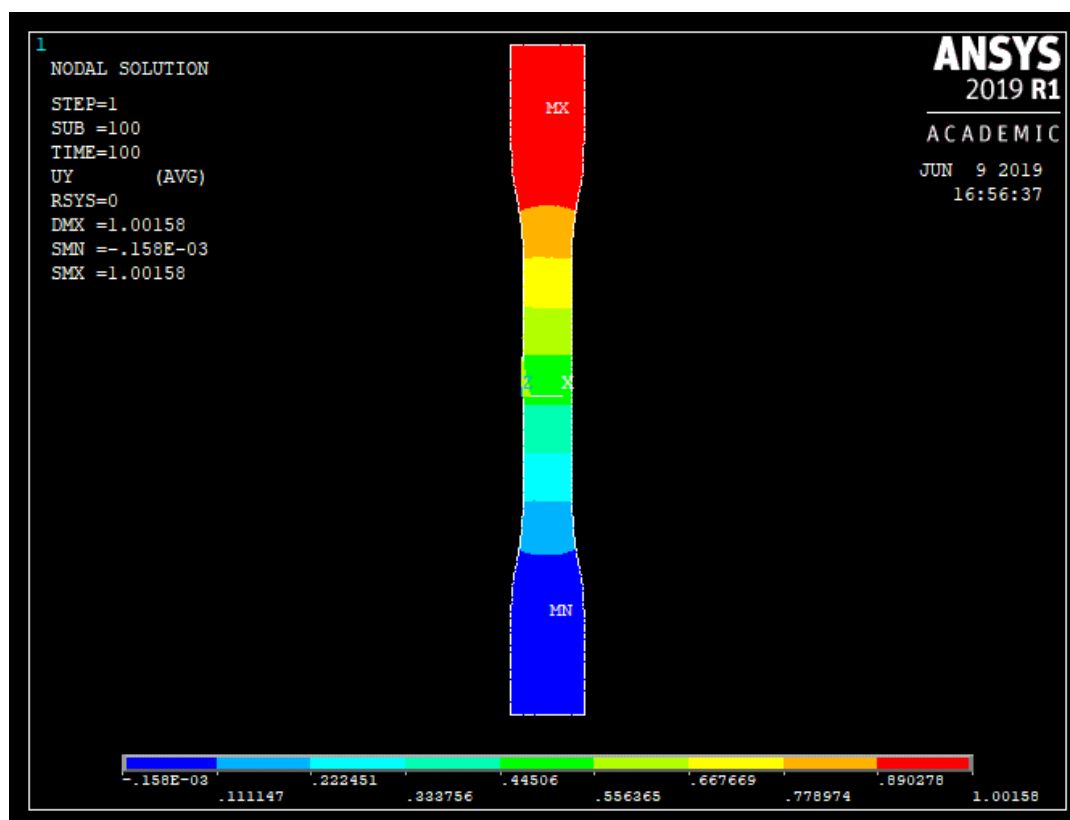


Figura 6.3 Desplaçaments longitudinals (x) de la proveta a tracció

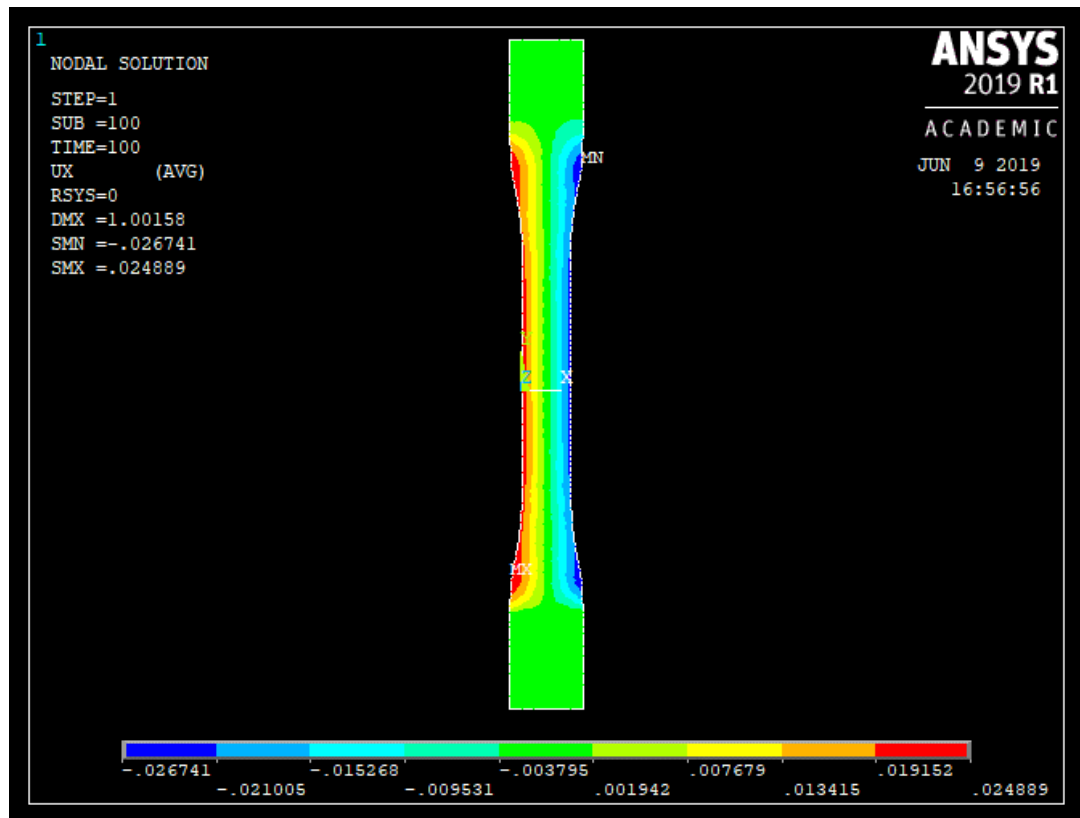


Figura 6.4 Desplaçaments transversals (y) de la proveta a tracció

La Figura 6.5 mostra la corba obtinguda de l'assaig experimental per a la proveta 1 assajada a tracció en comparació amb els valors resultants de les simulacions en aplicar diferents valors d'elongació. Es pot observar que els punts corresponents a la simulació per elements finits aproximen la corba, obtenint un error sempre inferior al 9% i validant així els resultats.

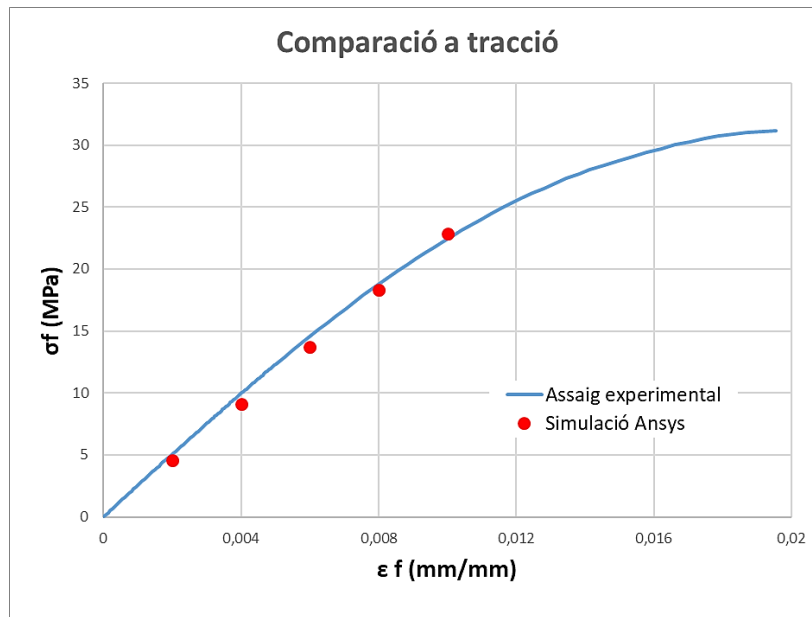


Figura 6.5 Gràfic comparatiu dels assaigs experimentals i la simulació per elements finits de les provetes a tracció

A continuació, es representa la distribució de tensions en la direcció x (vertical) obtingudes per al valor de desplaçament mencionat (Figura 6.6). Es pot apreciar com hi ha una distribució quasi uniforme de les tensions al llarg de la canya de la proveta, mentre que s'observen valors inferiors a les zones properes a les mordasses.

Es representa també la distribució de tensions de Von Mises, que té en compte les tensions en totes direccions, per comprovar si hi ha altres direccions rellevants (Figura 6.7). No s'aprecia un canvi significatiu entre ambdues, el qual indica que els valors de tensió més importants es troben a la direcció vertical.

Es decideix analitzar la distribució de tensions a la secció transversal central per comprovar que presenta una distribució uniforme. Aquesta distribució correspon a la Figura 6.7, amb unes tensions entre 22,8292 MPa i 22,8356 MPa. La diferència entre aquests dos valors és inferior al 0,02%, és a dir que es pot afirmar que aquesta distribució de tensions és uniforme.

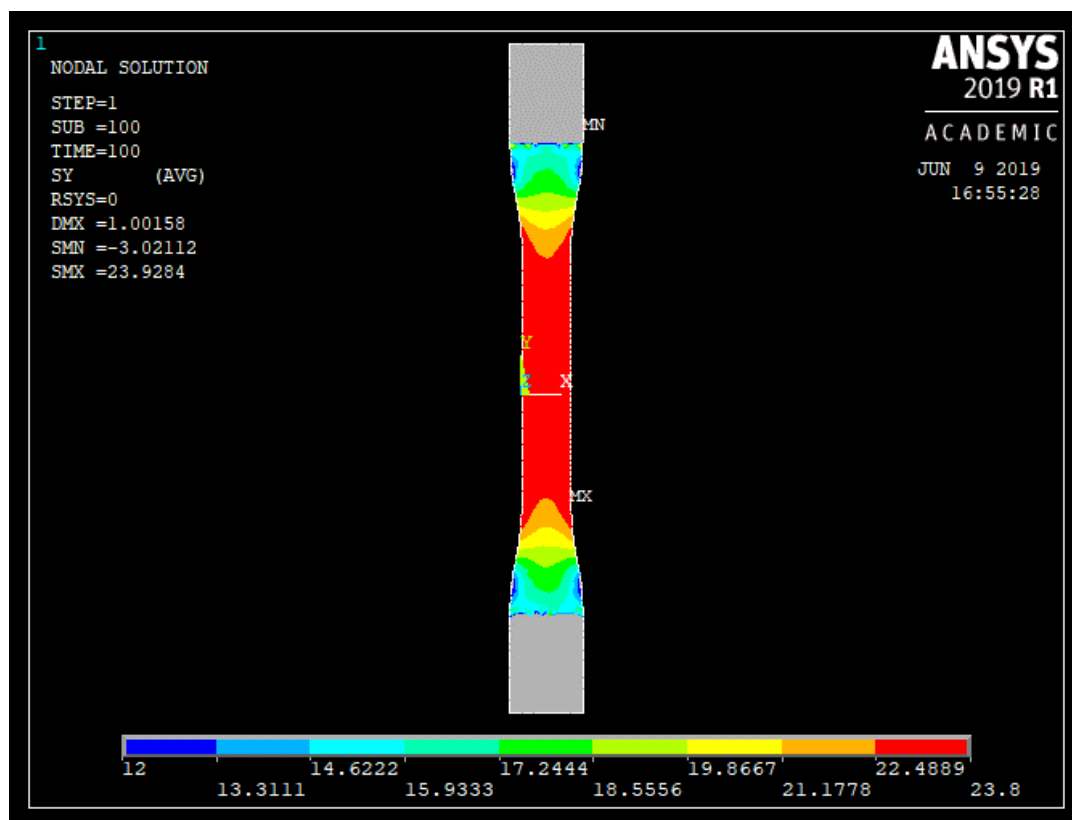


Figura 6.6 Distribució de tensions en direcció x de la proveta a tracció

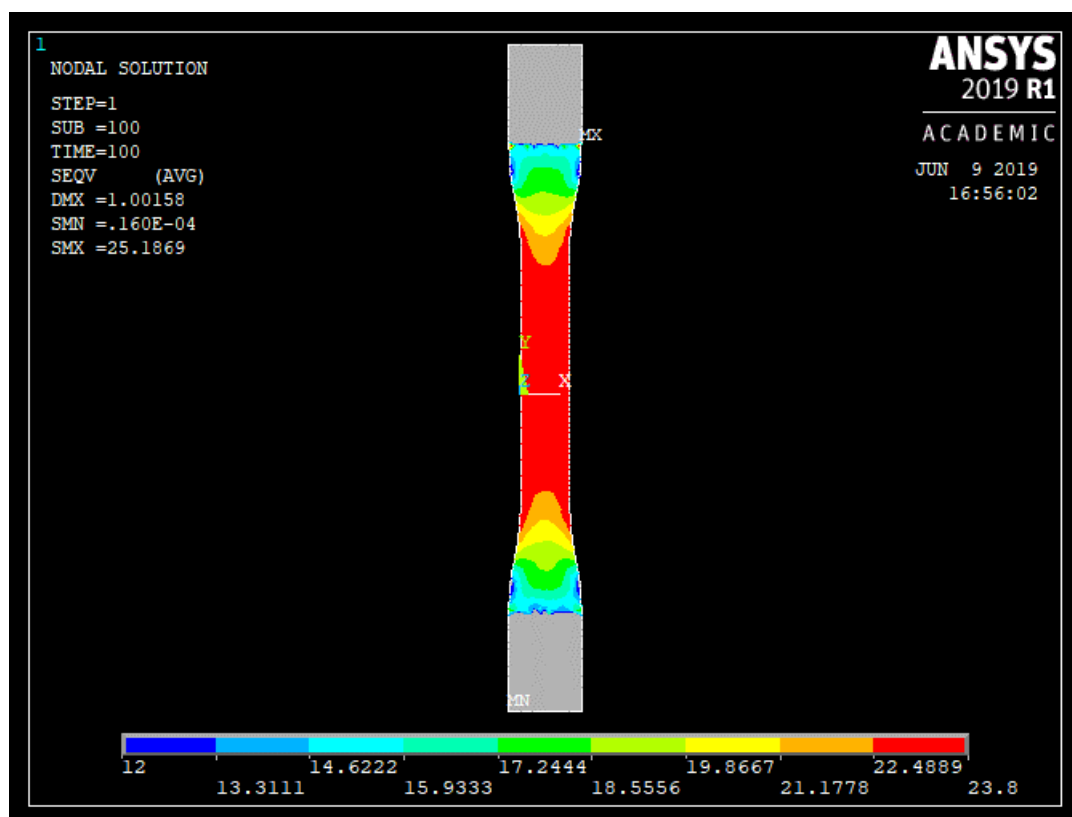


Figura 6.7 Distribució de la tensió de Von Misses de la proveta a tracció

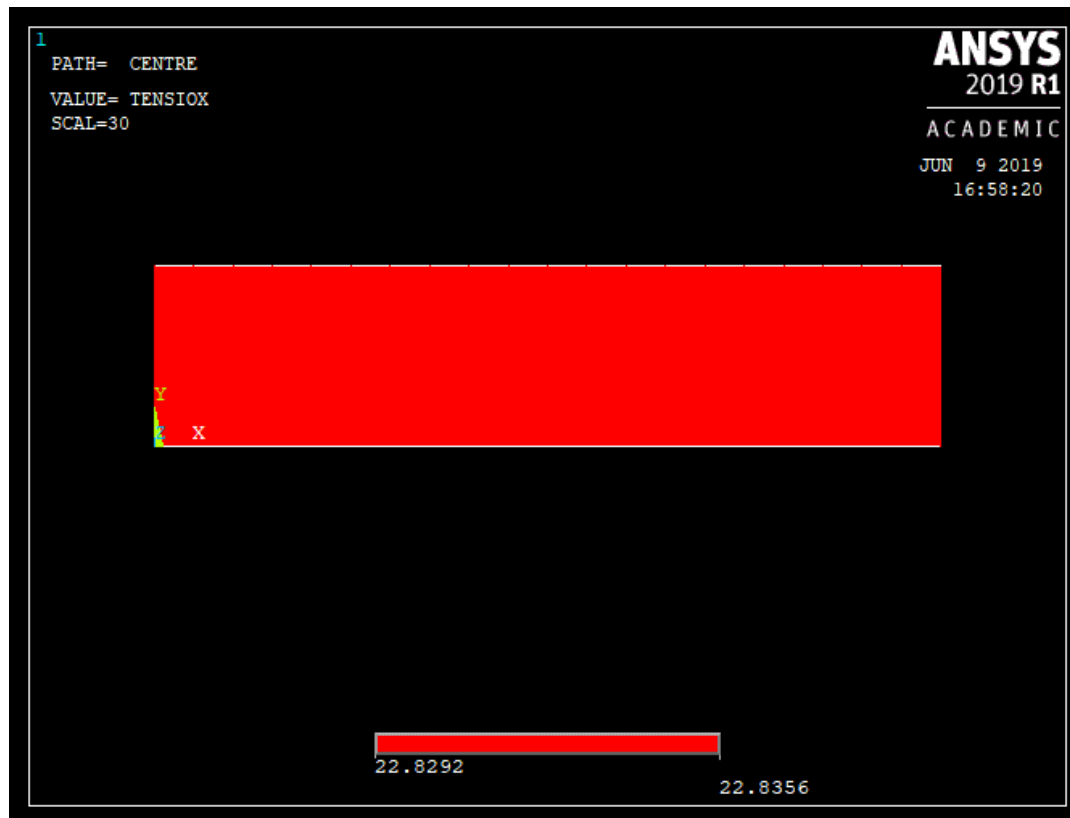


Figura 6.8 Distribució de tensions en la direcció x a la secció central de la proveta a tracció.

## 6.2. Compresió

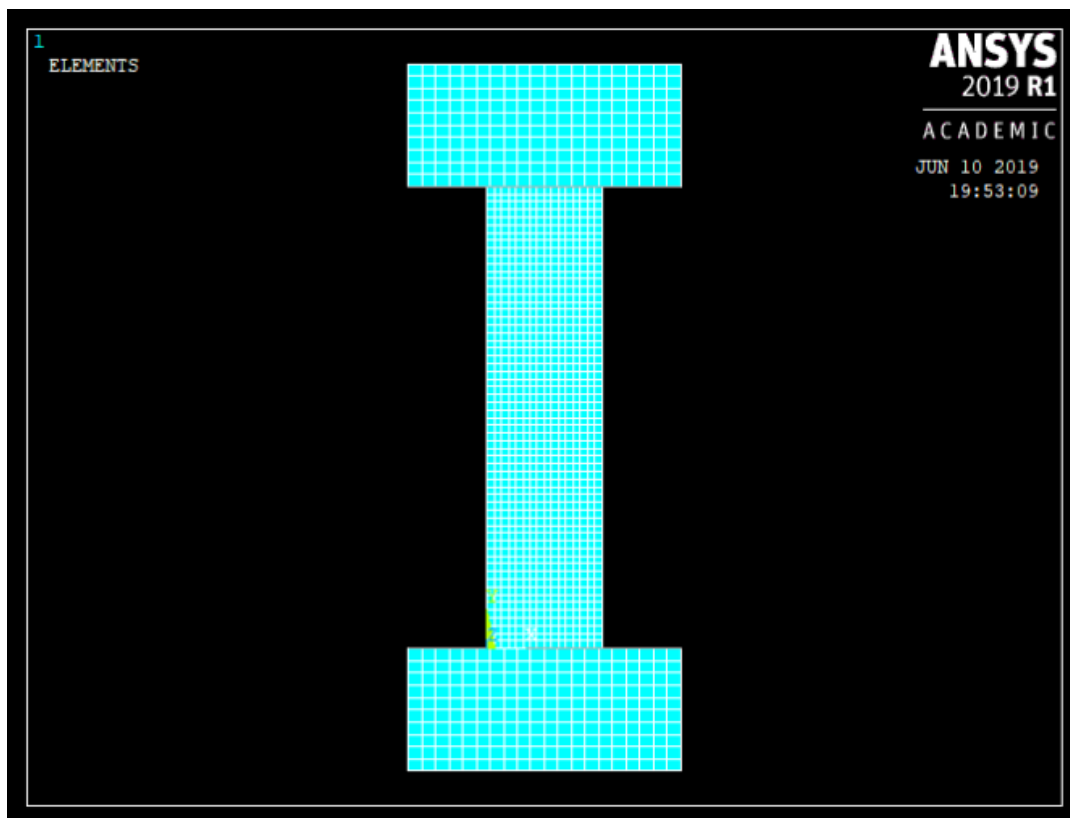
Per la simulació de l'assaig a compressió, es simules també les plaques d'acer de l'utilatge de l'assaig i s'introdueix un contacte entre la proveta i l'acer incorporant un coeficient de fricció aproximat de 0,4 (12). Per a cada sèrie de provetes s'introdueix un valor del Mòdul de Young diferent. La Taula 6.1 recull els valors emprats per a cada tipus de proveta.

Taula 6.1 Valors de mòdul elàstic emprats per a les simulacions de les provetes de compressió

|             | E (MPa) |
|-------------|---------|
| Prisma 2a   | 811     |
| Cilindre 2D | 1098    |
| Prisma 4a   | 1370    |
| Cilindre 4D | 1522    |

Les quatre provetes presenten figures molt similars en quant a geometria plana i peça mallada, per tant a la Figura 6.9 es mostra la imatge de la proveta, juntament amb les plaques d'acer mencionades per fer el contacte.





*Figura 6.9 Proveta de compressió i plaques d'acer de l'utilatge mallades*

Per a definir les condicions de contorn, es fixa la línia inferior de la placa d'acer de sota amb un desplaçament nul en totes direccions, i es defineix un desplaçament vertical negatiu a la placa d'acer superior. També es fixa el node central de la proveta de la zona en contacte amb la placa inferior per tal de restringir el moviment en la direcció y.

En finalitzar la simulació, es pot apreciar l'efecte del contacte amb coeficient de fricció. La Figura 6.10 mostra l'ampliació de la proveta deformada a la part inferior, on es veu com els elements en contacte amb la placa presenten un desplaçament gairebé nul.

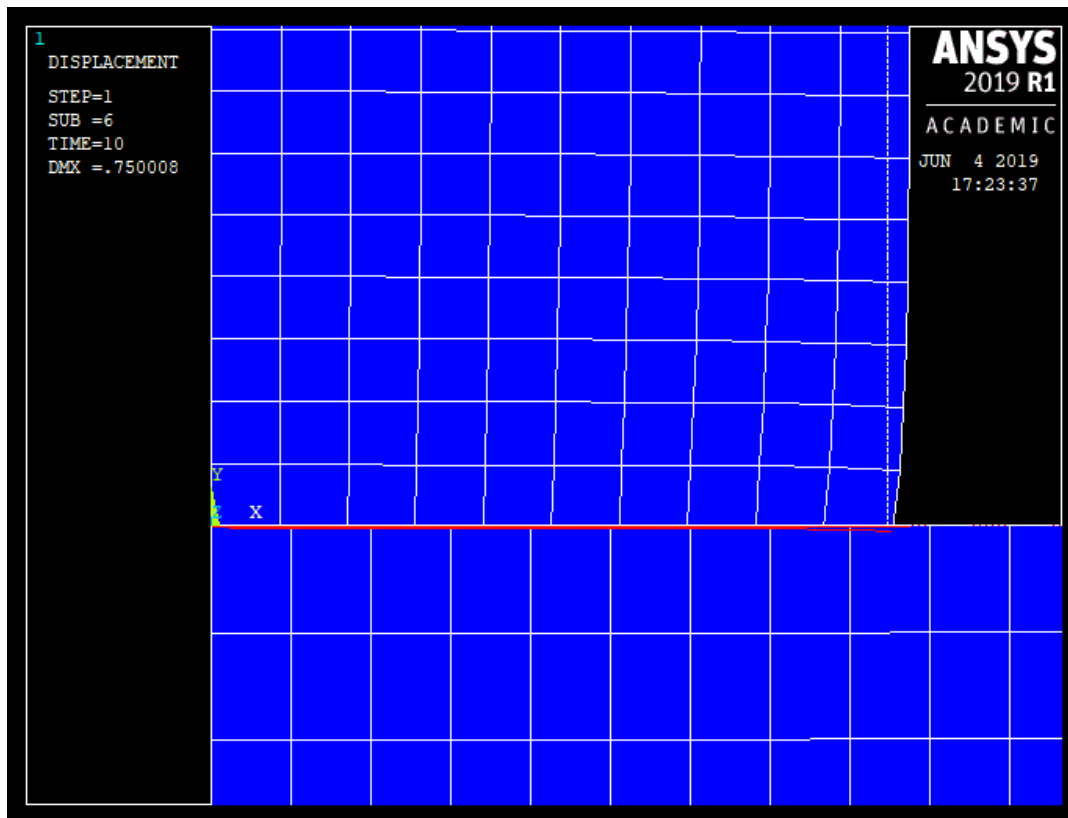


Figura 6.10 Ampliació d'una proveta de compressió deformada al final de la simulació

Per a un desplaçament màxim corresponent a una elongació d'aproximadament 0,03 mm/mm, s'analitzen els desplaçaments longitudinals (x) i transversals (y). Aquesta elongació suposa un desplaçament vertical negatiu de 0,75 mm per a les provetes curtes i de 1,5 mm per a les provetes llargues.

Les figures corresponen a la proveta llarga de secció quadrada, però qualitativament s'obtenen les mateixes distribucions en els desplaçaments.

Per als desplaçaments verticals, la placa d'acer inferior i la part de la proveta en contacte amb aquesta presenten un desplaçament nul, mentre que s'obté el valor de desplaçament màxim a la part superior de la proveta. En canvi, a la Figura 6.12, s'observa una distribució simètrica respecte l'eix vertical de la proveta, on hi ha un desplaçament transversal nul. Tanmateix, s'aprecia com les línies inferior i superior de la proveta presenten un desplaçament aproximadament igual a zero degut al contacte amb les plaques d'acer, fet que causa la deformació en forma de barril mostrada anteriorment.

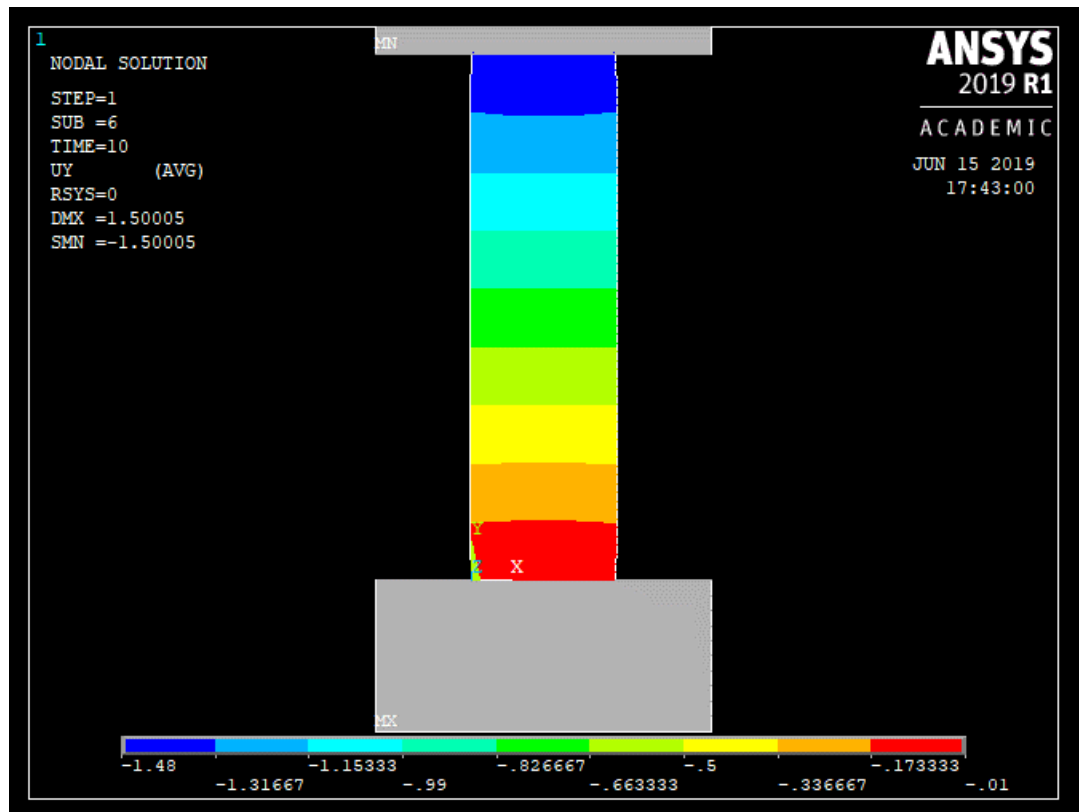


Figura 6.11 Desplaçaments verticals (x) per a la proveta de compressió

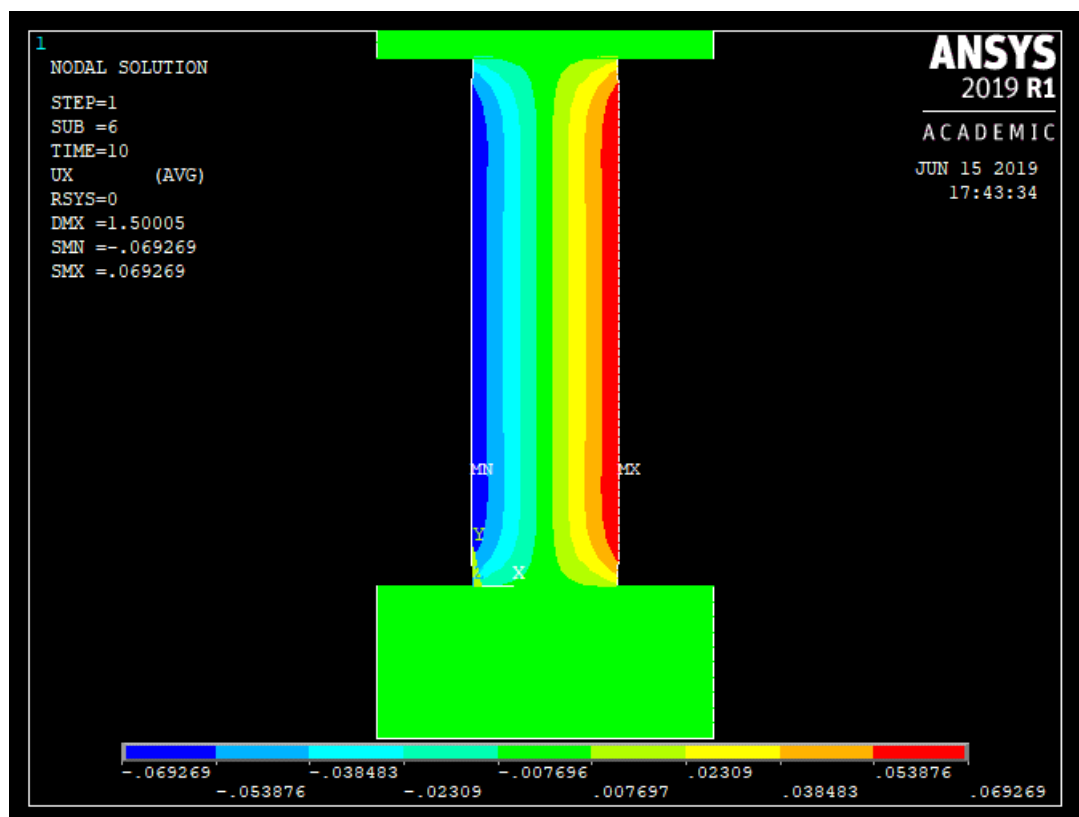


Figura 6.12 Desplaçaments transversals (y) per a la proveta de compressió

Es mesura la tensió a la secció central per a diferents valors d'elongació de les provetes per tal de validar les corbes obtingudes experimentalment. Es realitzen 5 mesures, i es comprova que l'error obtingut entre els valors simulats i els de la corba és sempre inferior al 3,5%. Les figures següents mostren els resultats obtinguts amb la simulació (Punts vermells) en relació amb una de les provetes de cada sèrie d'assajos a compressió.

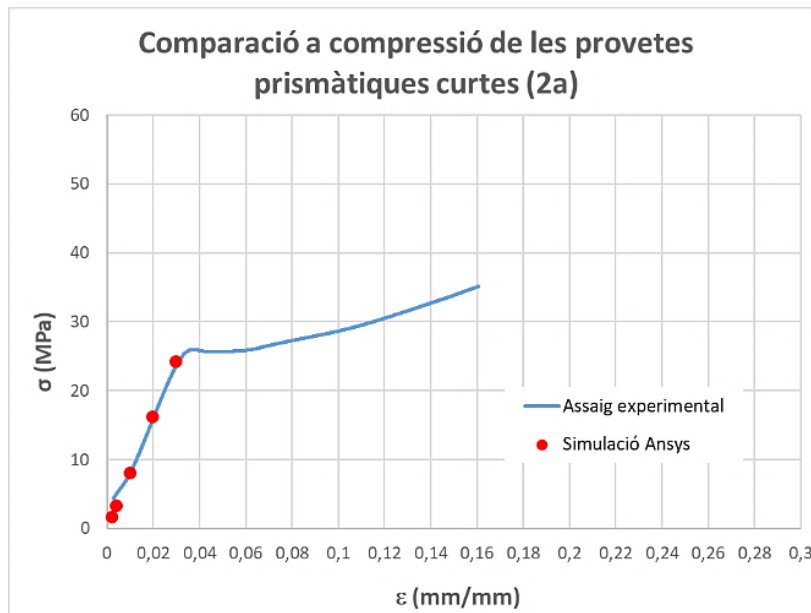


Figura 6.13 Gràfic comparatiu dels assaigs experimentals i la simulació per elements finits de les provetes a compressió 2a

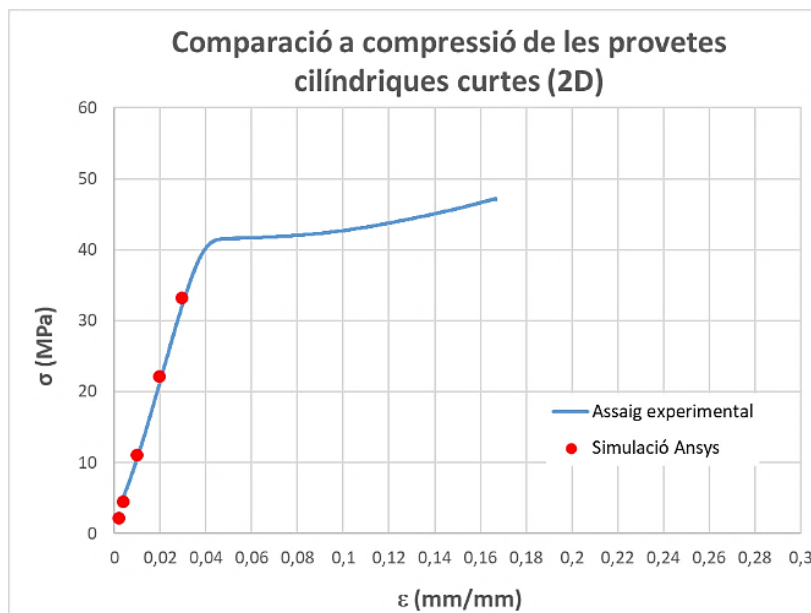


Figura 6.14 Gràfic comparatiu dels assaigs experimentals i la simulació per elements finits de les provetes a compressió 2D

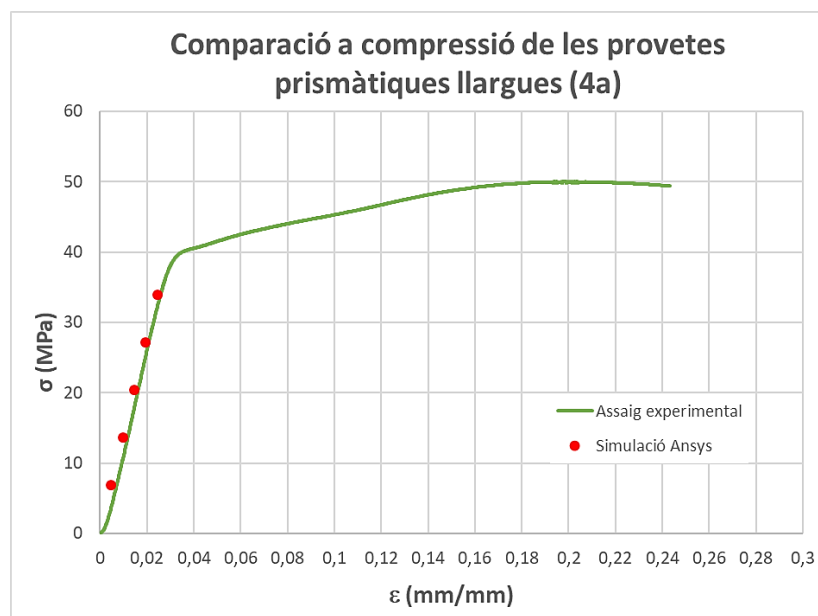


Figura 6.15 Gràfic comparatiu dels assaigs experimentals i la simulació per elements finits de les provetes a compressió 4a

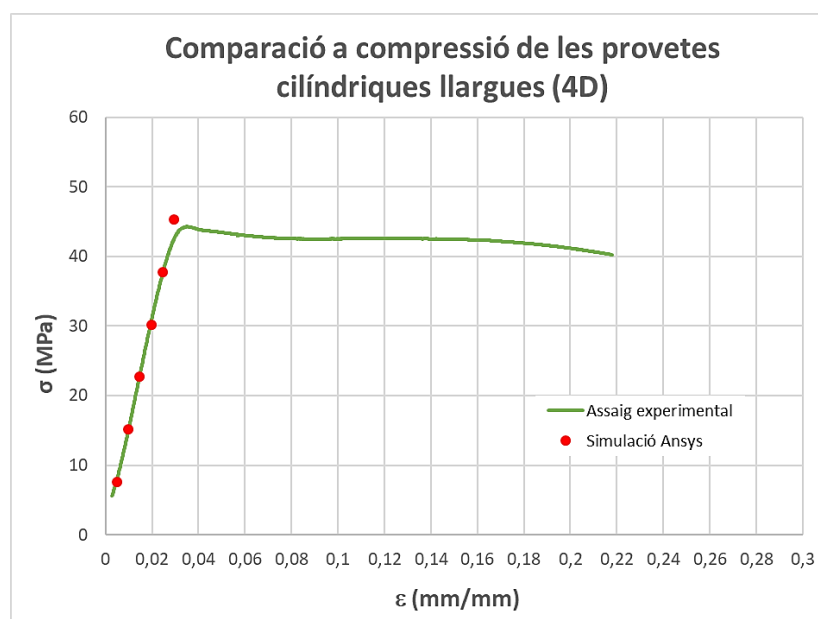


Figura 6.16 Gràfic comparatiu dels assaigs experimentals i la simulació per elements finits de les provetes a compressió 4D

Com es pot observar, tots els punts s'ajusten al tram lineal de les corbes, validant així els resultats obtinguts.

Seguidament, s'estudiaran amb més deteniment les distribucions de tensions per a cada proveta per intentar explicar les diferències observades experimentalment entre les diverses longituds i formes de secció assajades.

Les figures següents mostren la distribució de tensions en x de tota la proveta, tot indicant les

seccions a les que s'ha analitzat la distribució de tensions en la direcció x. S'han triat diverses seccions, entre elles les cares superior i inferior, la secció central i alguna secció intermèdia. Per a cada proveta, s'ha fixat una escala de colors concreta que permet comparar els diferents valors a cada secció visualment.

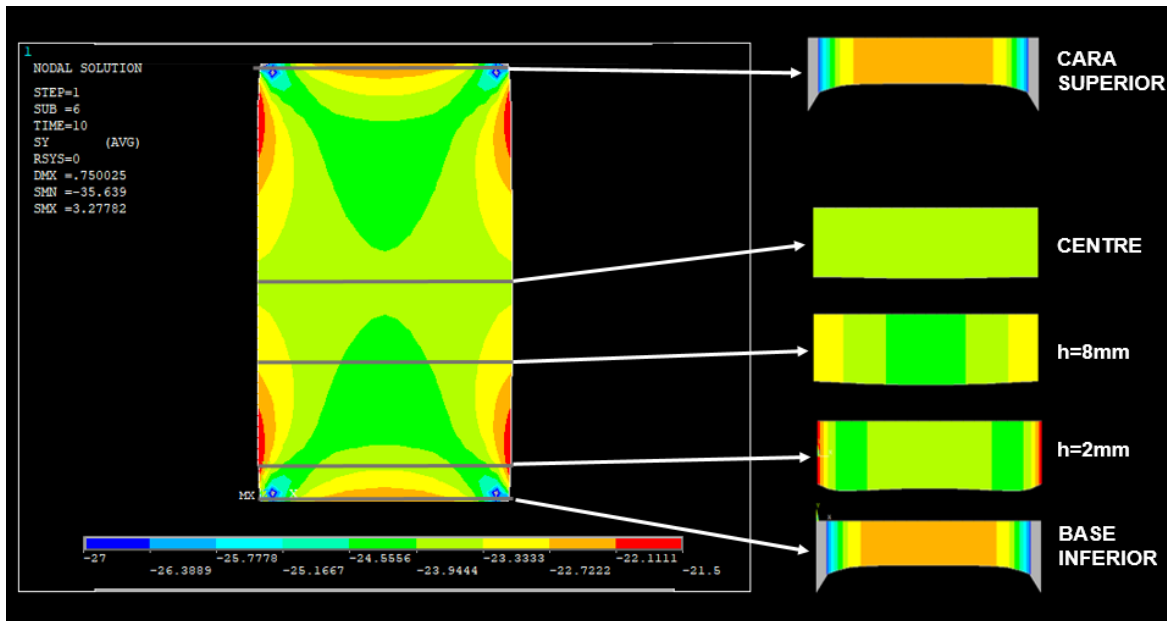


Figura 6.17 Distribucions de tensions de la proveta curta prismàtica de compressió

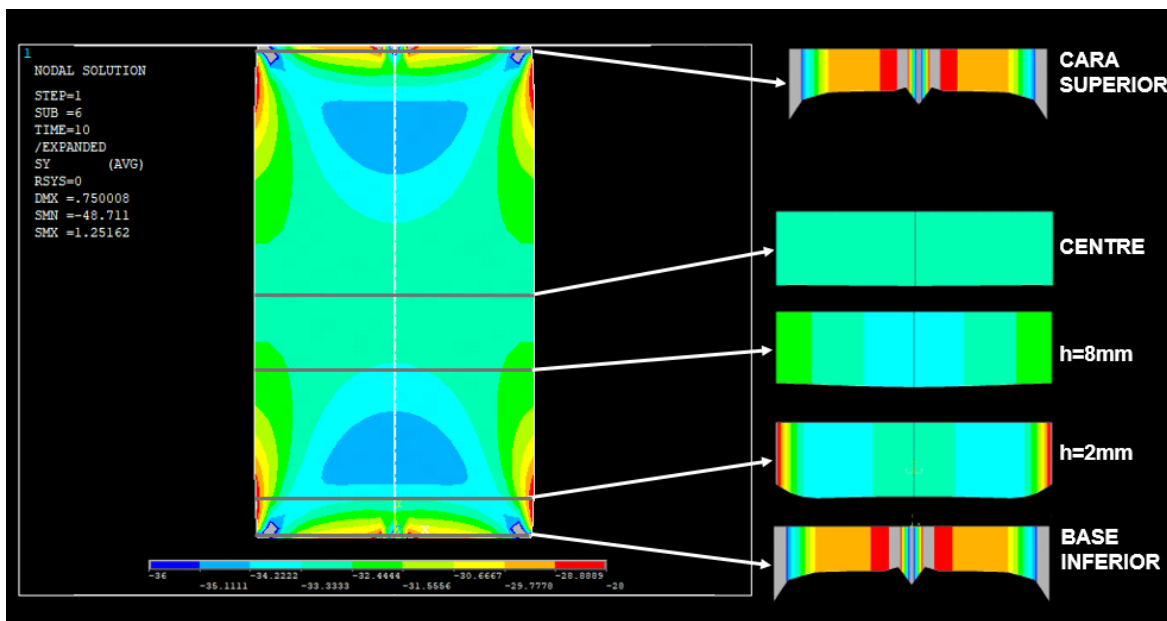


Figura 6.18 Distribucions de tensions de la proveta curta cilíndrica de compressió

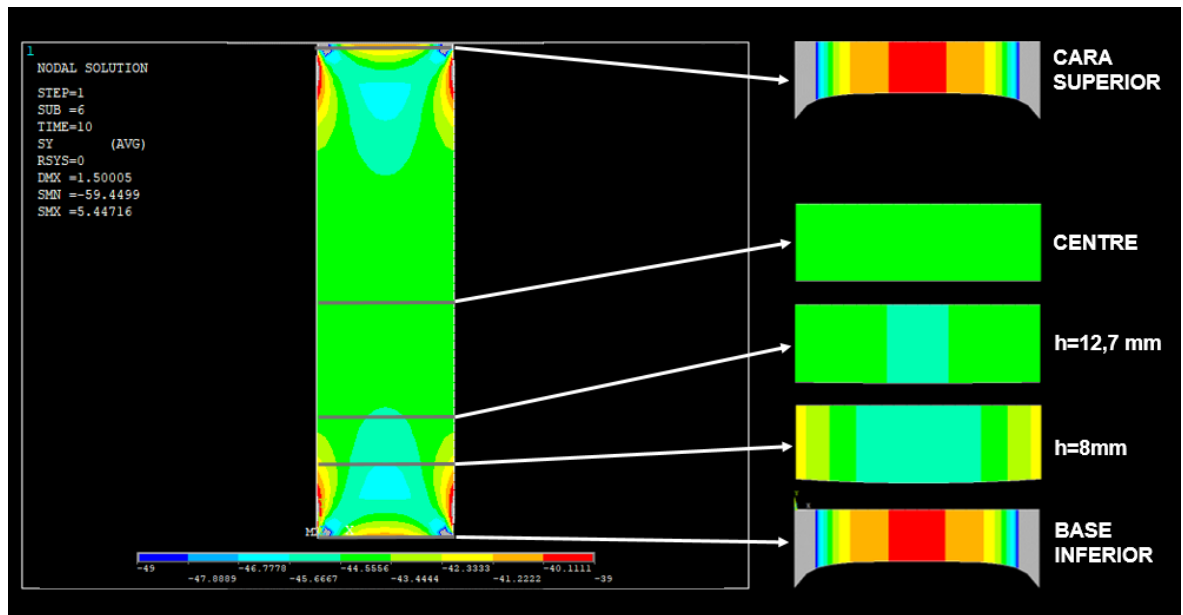


Figura 6.19 Distribucions de tensions de la proveta llarga prismàtica de compressió

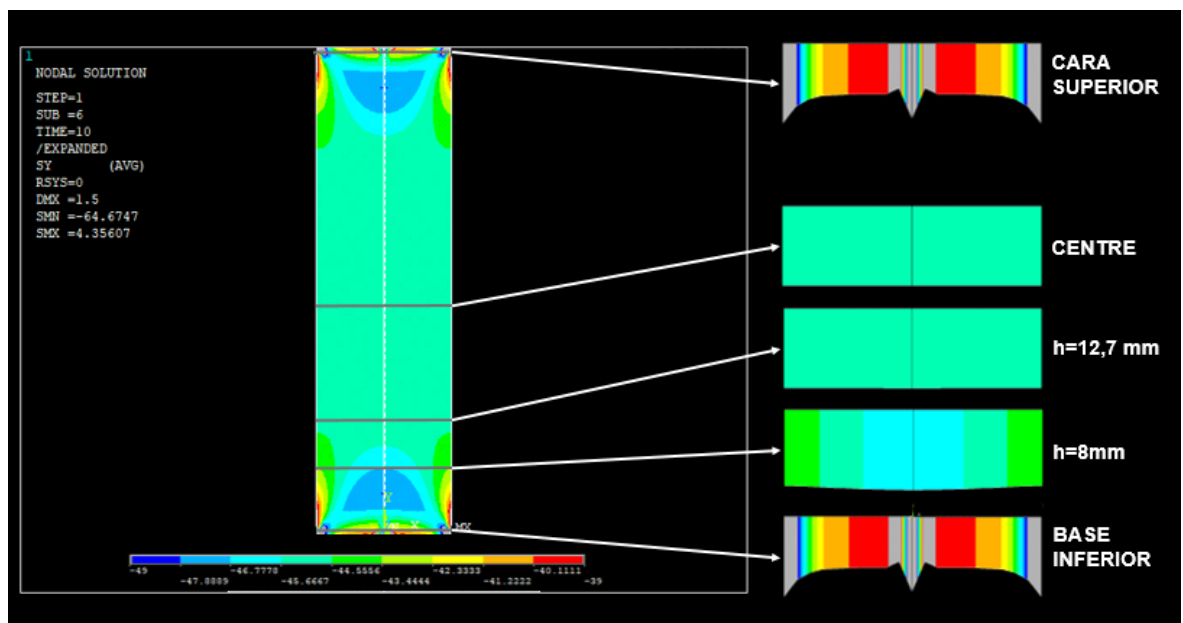


Figura 6.20 Distribucions de tensions de la proveta llarga cilíndrica de compressió

No s'aprecia cap diferència significativa en el que respecta a la variació de la forma de la secció, comparant les seccions quadrada i circular. Tanmateix, es pot veure clarament que les provetes amb una longitud superior presenten una distribució de tensions quasi uniforme en una zona central més àmplia. Mentre que a les provetes de longitud menor apareix una petita variació en el valor de les tensions a només tres o quatre mm de la secció central, a les provetes més llargues, aquest tram uniforme mesura aproximadament 25 mm, el qual suposa un 50% de la longitud total de la proveta.

Es representen les tensions de Von Misses per a cada proveta (Figura 6.21 a Figura 6.24).

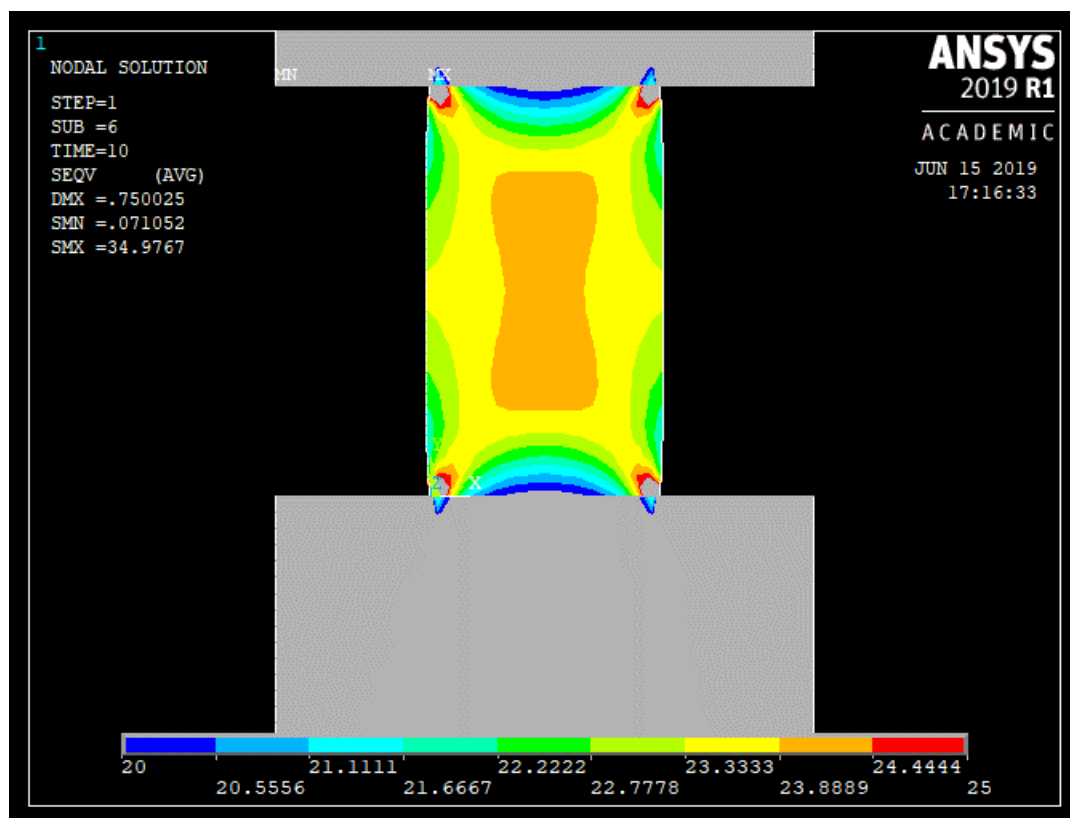


Figura 6.21 Distribució de tensions de Von Misses per a la proveta 2a de compressió

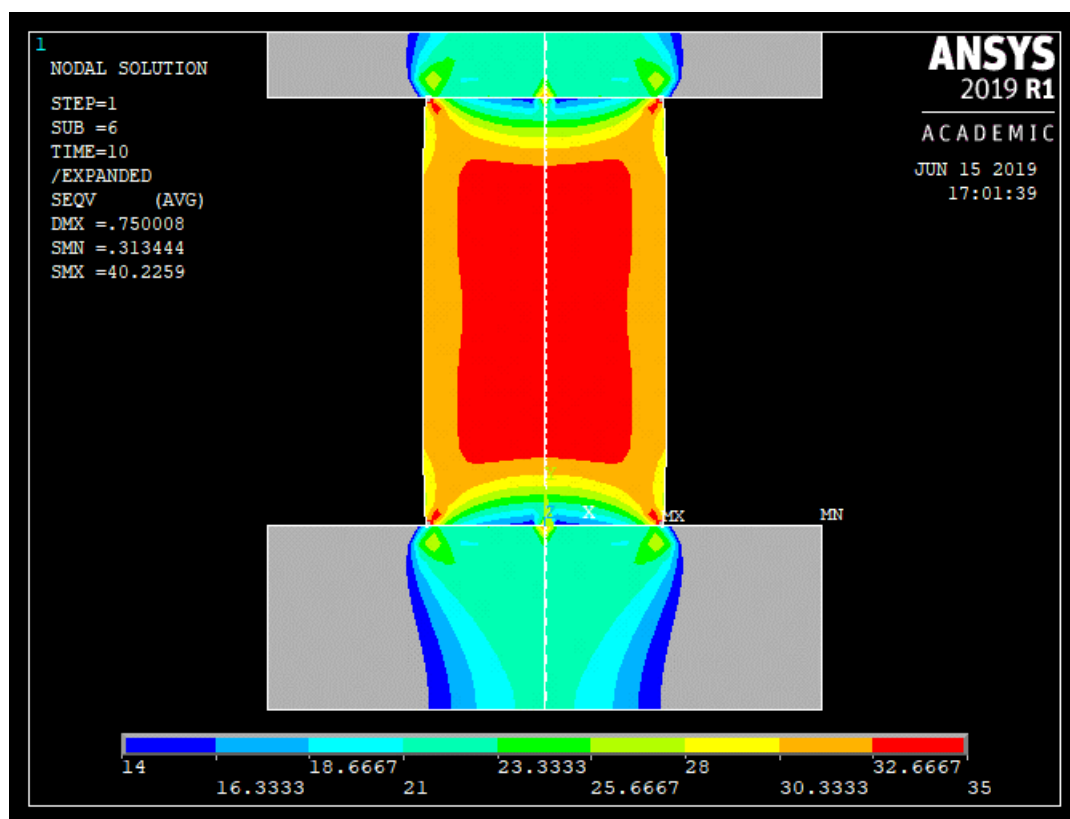


Figura 6.22 Distribució de tensions de Von Misses per a la proveta 2D de compressió



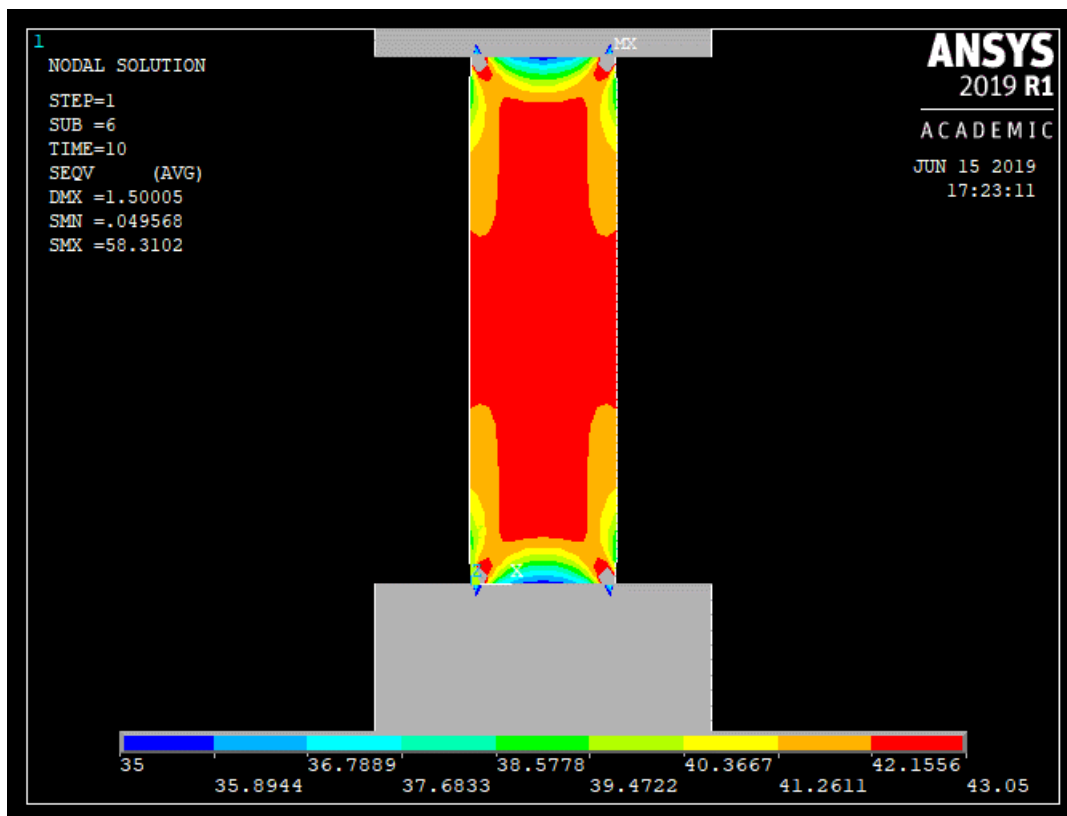


Figura 6.23 Distribució de tensions de Von Mises per a la proveta 4a de compressió

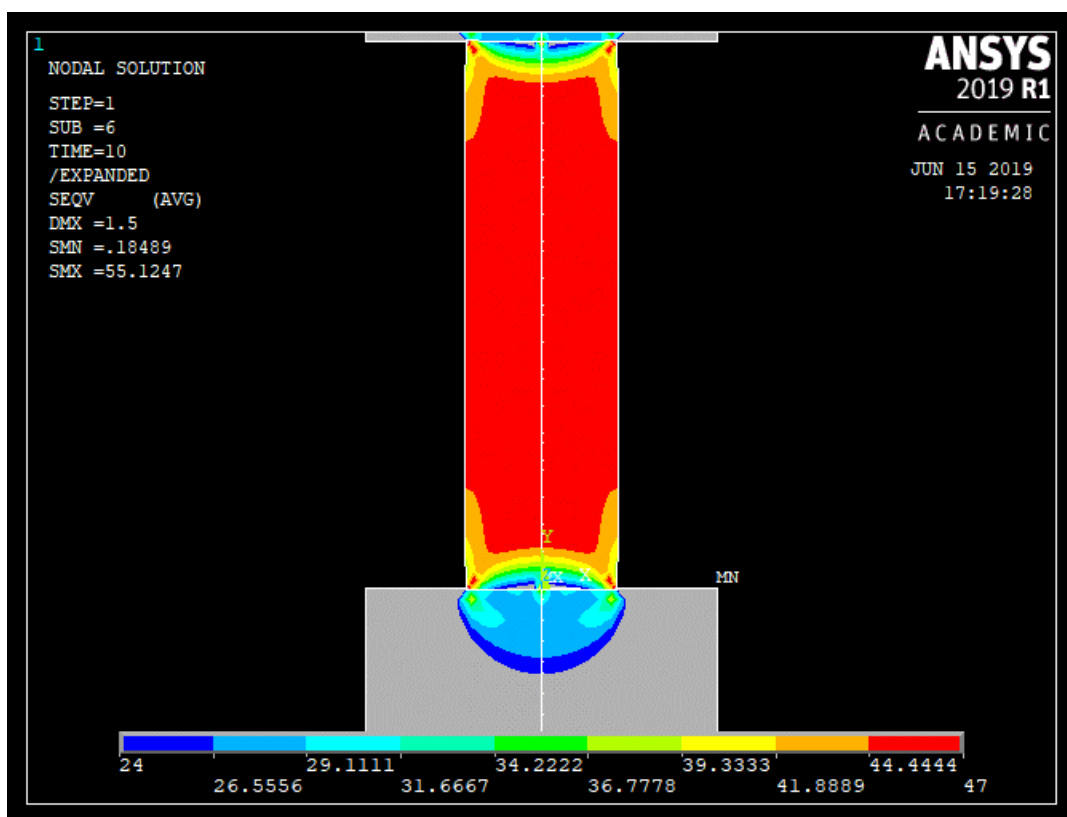


Figura 6.24 Distribució de tensions de Von Mises per a la proveta 4D de compressió

S'observa que les distribucions són similars a les obtingudes a l'analitzar només les tensions en x, així com els valors d'aquestes a les seccions centrals, que són lleugerament superiors per a les tensions de Von Mises, ja que té en compte totes les direccions. No obstant, es verifica que les tensions longitudinals són les més rellevants.

### 6.3. Flexió

Per a les provetes a flexió, es defineix el material amb un mòdul elàstic de 2640 MPa i un coeficient de Poisson de 0,37.

En aquest cas, es modela la meitat de la proveta i el suport on es recolza. Les condicions de contorn s'apliquen sobre aquest suport, fixant el desplaçament de la seva línia inferior a zero. S'imposa un desplaçament vertical negatiu al node corresponent al punt central de la proveta, simulant el desplaçament de l'assaig. La Figura 6.25 mostra la peça deformada al final de la simulació. Es pot veure també el mallat de la proveta i del suport.

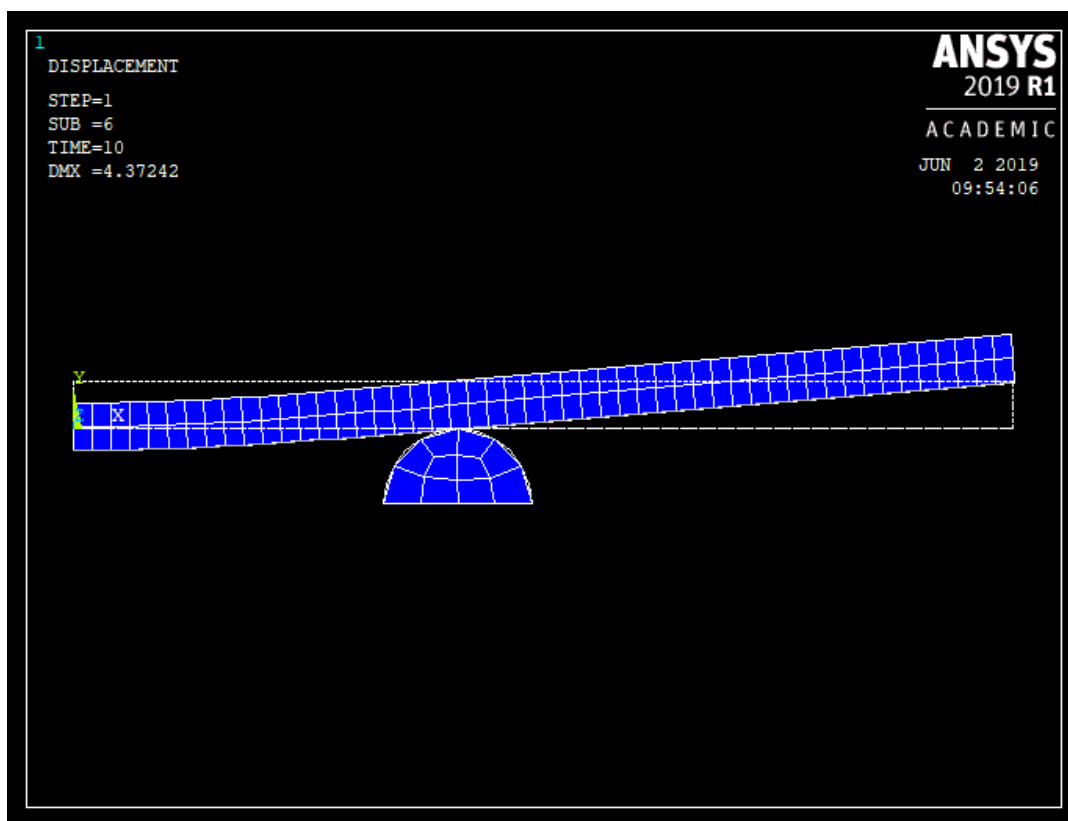


Figura 6.25 Provena de flexió deformada al final de la simulació

Seguint el mateix procediment que als apartats anteriors, es realitza la simulació amb diversos valors de desplaçament com a condició de contorn i s'obtenen valors de tensió mesurats al punt inferior de la secció central de la proveta per comparar-los amb la corba tensió-deformació obtinguda experimentalment. Aquests valors es poden veure a la Figura 6.26.

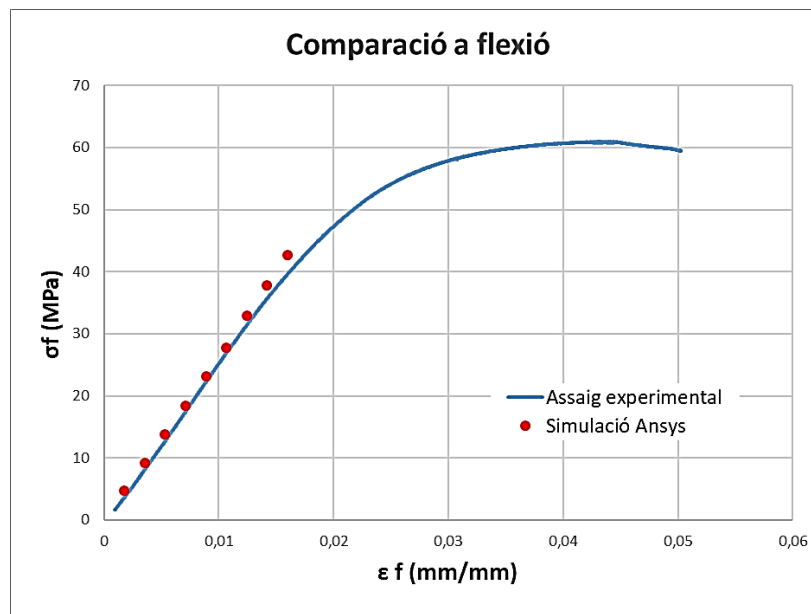


Figura 6.26 Gràfic comparatiu dels assaigs experimentals i la simulació per elements finits de les provetes a flexió

Els punts trobats mitjançant simulació per elements finits s'ajusten a la corba experimental amb un error casi nul, validant així els resultats.

Seguidament, s'analitzen les distribucions de tensions en la direcció x per a un valor de desplaçament vertical alt (2,6 mm) i un valor inferior (0,25 mm). Per ambdós casos es representa també la distribució de tensions a la secció central de la proveta.

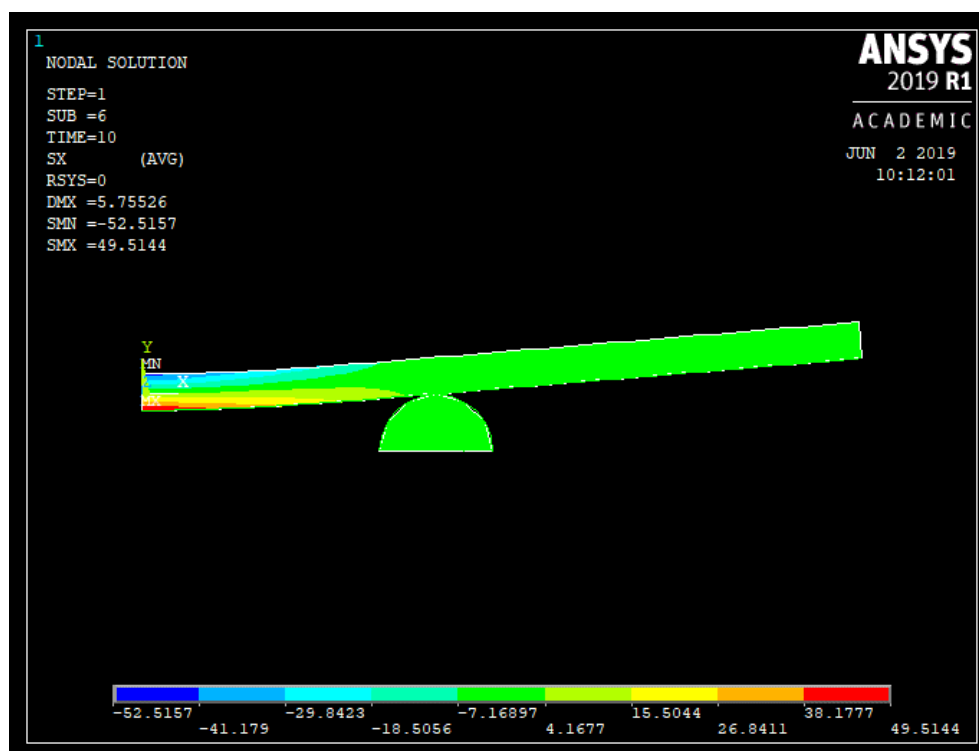


Figura 6.27 Distribució de tensions en direcció x de la proveta a flexió per a un desplaçament de 2,6 mm

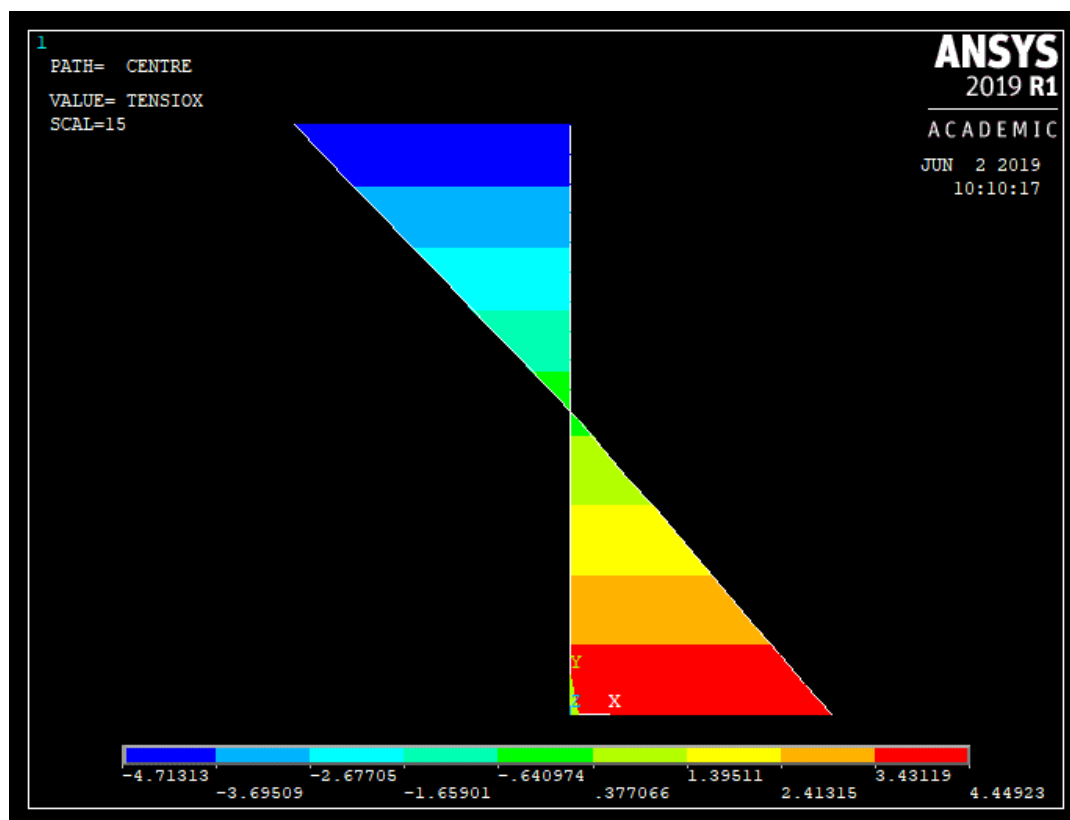


Figura 6.28 Distribució de tensions a la secció central de la proveta de flexió per un desplaçament de 0,25 mm

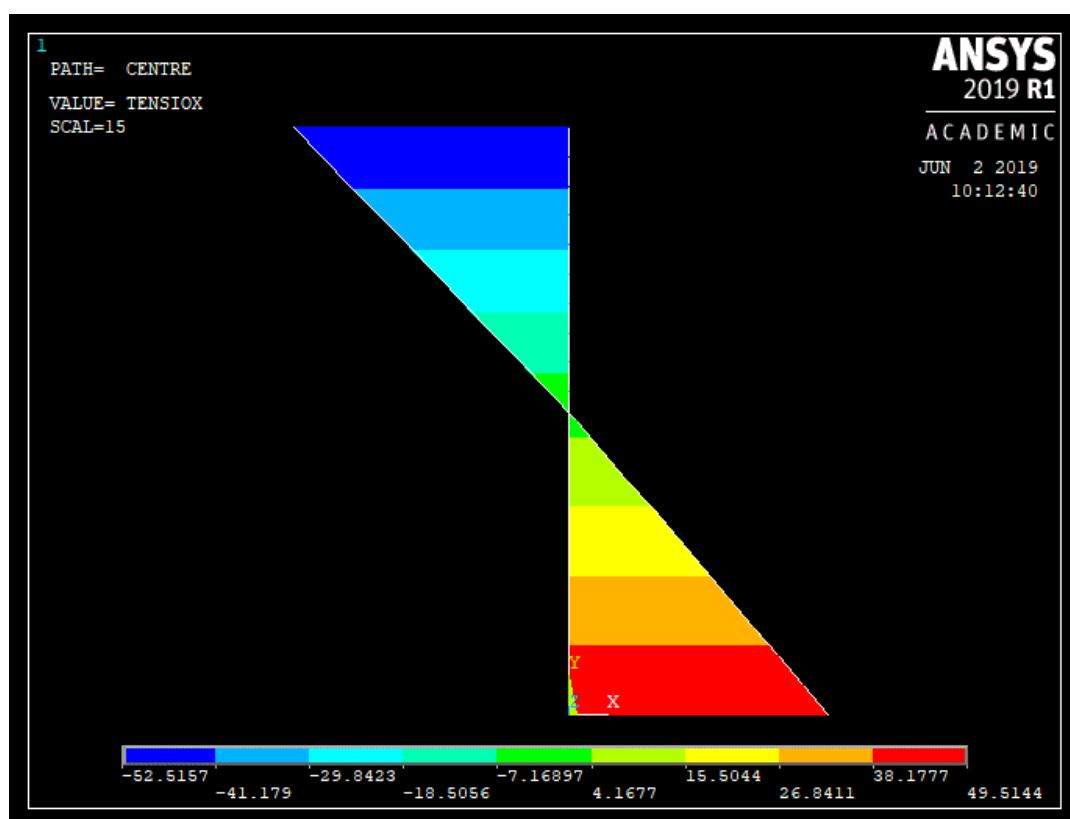


Figura 6.29 Distribució de tensions a la secció central de la proveta de flexió per un desplaçament de 2,6 mm

Observant les distribucions de la secció per a diferents valors de deformació, es pot apreciar el comportament descrit a l'apartat 5.2.3, degut a la reacció amb els suports, generant un esforç normal que provoca que la distribució de tensions no sigui simètrica. En valor absolut, la tensió superior s'incrementa respecte a l'extrem inferior. En aplicar un desplaçament de 0,25 mm (Figura 6.28), aproximadament la distància entre suports entre 200 (L/200), els valors superior i inferior de la tensió  $\sigma$  són molt similars, presenten una diferència de 0,3 MPa. D'altra banda, en imposar un desplaçament de 2,6 mm, s'observa una diferència de 3MPa (Figura 6.29).

## 7. Pressupost

El cost teòric del projecta s'eleva a 10200 € i es desglossa a la taula següent:

*Taula 7.1 Taula resum dels costos del projecte*

| Concepte   |                       | Cost unitari | Quantitat   | Total (€) |
|--|-----------------------|--------------|-------------|-----------|
| Personal   | Enginyer junior       | 15 €/h       | 360 h       | 5400      |
|  | Director              | 50 €/h       | 30h         | 1500      |
|  | Subtotal              |              |             | 6900      |
| Utilització de màquines:<br>Fabricació i assaigs | Impressió FDM         | 20 €/proveta | 36 provetes | 720       |
|  | Assaigs de laboratori | 30 €/proveta | 36 provetes | 1080      |
|  | Subtotal              |              |             | 1800      |
| Software   | Soild Works           | 500 €        | -           | 500       |
|  | Ansys                 | 1000€        | -           | 1000      |
|  | Subtotal              |              |             | 1500      |
| Total  |                       |              |             | 10200     |

Els costos de la fabricació i assaig de les provetes són aproximats, i s'ha estimat el cost d'amortització per a l'ús de les llicències comercials dels softwares utilitzats, tot i que durant la realització del projecte s'ha utilitzat una llicència educacional. El cost del personal a càrrec de les màquines està inclòs en el cost de fabricació i assaig d'aquestes.

## 8. Impacte mediambiental

Les provetes han estat fabricades amb PLA, un material que s'obté de la fermentació de productes agrícoles i no del petroli. És un material biodegradable sota condicions industrials, que inclouen una temperatura superior a l'ambiental i la descomposició per hidròlisi per ser reciclat o compostat. Per tant, tot i que es requereix un procediment industrial de degradació, no és un polímer amb una descomposició molt duradora que romandrà intacte molts anys. No obstant, la sintetització de l'àcid polilàctic sí que és un procés costós amb un efecte sobre el medi ambient.

Tant les provetes com els assaigs es van realitzar a l'ETSEIB, per tant no cal tenir en compte un impacte degut al transport de les provetes durant els diferents passos dels assaigs experimentals. Caldria tenir en compte l'impacte del transport per portar el material fins al departament on s'han imprès, però la quantitat de material utilitzat no ha sigut molt elevada i aquest efecte no és gaire significatiu en proporció.

Per últim, cal tenir en compte l'electricitat utilitzada per operar la impressora 3D, així com la maquinària d'assaig de les provetes i els ordinadors on s'ha realitzat tot el treball. Aquesta electricitat, en funció del seu origen presentarà impactes diferents.





## 9. Conclusions

A partir dels resultats extrets amb els assaigs per als diferents esforços, es conclou que el mòdul elàstic de compressió és el més baix. D'altra banda la resistència més alta obtinguda per part de les provetes ha estat la de flexió, mentre que les provetes a tracció són les que han presentat una elongació significativament més baixa.

S'han observat diferències en les propietats trobades a compressió per a diferents seccions i longituds. En quant a la longitud, es corrobora el que recomana la normativa d'utilitzar provetes més llargues per a obtenir determinades propietats mecàniques, com el mòdul d'elasticitat i la resistència a compressió, ja que com s'ha vist a les simulacions, presenten un gran tram central amb una distribució uniforme. També cal mencionar que les provetes cilíndriques mostren menys dispersió en els resultats. Per aquest motiu, la recomanació per a la realització de futurs assaigs és utilitzar provetes llargues (tot mantenint les restriccions d'esveltesa indicades a la normativa) i de secció circular.

Pel que fa a la forma de les provetes de compressió, s'han obtingut resultats diferents sense que es pugui justificar de forma clara a partir de les simulacions. És possible que calgui simular el procés de fabricació de les provetes per observar aquest comportament, ja que hi ha paràmetres relatius a la fabricació que poden afectar les propietats finals en estar fetes per capes i tenir una estructura interna porosa, que pot dependre de variables no incloses en l'anàlisi numèrica. A banda de la influència específica que pot tenir la tecnologia de fabricació, és conegut que les provetes de formigó tenen un factor forma segons el tipus de proveta (funció de la forma de secció i alçada o longitud de la proveta).

Respecte a la simulació per elements finits, s'han validat els resultats obtinguts experimentalment i s'ha pogut comprovar la sensibilitat del model a les condicions d'enllaç. En funció de la precisió amb la que s'introdueixen aquestes condicions, tenint en compte el coeficient de fricció i els elements de la màquina d'assaig o no, s'obtenen distribucions de tensions diferents, afectant en especial als resultats de les provetes a compressió curtes, ja que la influència de les condicions de contorn als extrems (plaques d'acer entre màquina i proveta) és més important si la longitud és menor.

En resum:

- S'han determinat les propietats mecàniques del PLA fabricat per FDM, a tracció, compressió i flexió. Els resultats han estat força consistents, atenent a la poca dispersió de cada grup de provetes, i a la correlació mostrada amb resultats disponibles.
- Pel que fa a l'assaig de compressió,

- a. S'ha demostrat que hi ha menys variabilitat de resultats en les provetes cilíndriques, i que s'hauria de seguir la recomanació de la norma ASTM D695 pel que fa a la relació secció/alçada, tot i no ser molt freqüent d'acord amb la literatura consultada.
- b. S'ha confirmat que el model d'elements finits, tot i incloure no linealitat geomètrica, si no té en compte el procés de fabricació, no pot reproduir el comportament no uniforme de les tensions. Hem pogut comprovar, però, que és sensible a les condicions de contorn aplicades als extrems de la proveta. Es considera satisfactori el coneixement que s'ha pogut adquirir en aquest aspecte.

## Agraïments

M'agradaria agrair al Departament d'Enginyeria Mecànica de l'ETSEIB la seva ajuda en la fabricació de les provetes, en especial a en Ramón Casado. Igualment, agrair la orientació rebuda per part del Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria durant la redacció del treball i el temps i recursos dedicats per part del laboratori i del tècnic Francesc Joaquim Garcia per a l'assaig de totes les provetes.

També m'agradaria fer menció a la meva tutora, la Maria Magdalena Pastor, per haver-me ajudat i orientat des de l'inici del projecte i haver-se implicat tant en el progrés de tot el treball.

Per últim, agrair a la meva família i tots els amics i companys de grau que han dedicat temps a donar la seva opinió i suport per poder realitzar amb èxit aquest treball.

## Bibliografia

1. *Mechanical characterization of 3D printed polymers*. **Dizon, John Ryan C., et al.** s.l. : Elsevier B.V., 2017, Additive Manufacturing, Vol. 20, p. 44-67.
2. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. **Ahn, Sung-Hoon, et al.** 4, 2002, Rapid Prototyping Journal, Vol. 8, p. 248-257.
3. **Redwood, Ben.** 3D Hubs. *Additive Manufacturing Technologies: An Overview*. [En línia] [Data: 15 / Abril / 2019.] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview#vat-photopolymerization>.
4. **Cain, Perry.** 3D Hubs. *Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D Printing*. [En línia] <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing>.
5. **Innofil 3D.** Fitxa tècnica del PLA. [En línia] 10 / Juliol / 2017. <https://www.innofil3d.com/product-category/pla/>.
6. **Perkowski i Casey.** Tensile-Compressive Asymmetry and Anisotropy of Fused Deposition Modeling PLA under Monotonic Conditions. *ELECTRONIC THESES AND DISSERTATIONS*. 2017.
7. **MakerBot.** PLA and ABS Strength Data. *MakerBot*. [En línia] [https://downloads.makerbot.com/legal/MakerBot\\_R\\_\\_PLA\\_and\\_ABS\\_Strength\\_Data.pdf](https://downloads.makerbot.com/legal/MakerBot_R__PLA_and_ABS_Strength_Data.pdf).
8. **UltiMaker.** Technical data sheet PLA. [En línia] Novembre / 2018. <https://ultimaker.com/download/74970/UM180821%20TDS%20PLA%20RB%20V11.pdf>.
9. **Gruber, Patrick i O'Brien, Micheal.** Polylactides "NatureWorks® PLA". *Biopolymers Online*. [En línia] 2014. <https://doi.org/10.1002/3527600035.bpol4008>.
10. **Hamad, K., et al.** eXPRESS Polymer Letters. [En línia] Novembre / 2015. [Data: 8 / Abril / 2019.] [www.expresspolymlett.com](http://www.expresspolymlett.com).
11. **BCN3D Technologies.** [En línia] [Data: 8 / Abril / 2019.] <https://www.bcn3dtechnologies.com/es/3d-printer/filaments/>.
12. **Bainbridge, Jamie.** *3D Printing Filament Properties*. [En línia] Desembre / 2017. [Data: 15 / Abril / 2019.] <https://github.com/superjamie/lazyweb/wiki/3D-Printing-Filament-Properties>.
13. **Pawar, Rajendra, et al.** Biomedical Applications of Poly(Lactic Acid). *Recent Patents on*

*Regenerative Medicine*. s.l. : Bentham Science Publishers, 2014, Vol. 4, p. 40-51.

14. **ASTM D638-02a**. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM International*. West Conshohocken, PA : s.n., 2002.

15. **ASTM D695-02a**. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. *ASTM International*. West Conshohocken, PA : s.n., 2002.

16. **ASTM, D790-02**. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. *ASTM International*. West Conshohocken, PA : s.n., 2002.

17. **ANSYS, Inc.** ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1.

18. *Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects*. **Mohamed, Omar, Masood, Syed H. i Bhowmik, Jahar L.** Febrer / 2015, *Advances in Manufacturing*, p. 42-52.

19. *Mechanical properties analysis of polyetherimide parts fabricated by fused deposition modeling*. **Jiang, Shenglong, et al.** 2018, *High Performance Polymers*, Vol. 31.

20. **Rookie electronics**. Rookie electronics. *3D Printing Technologies | Types of 3D Printing*. [En línia] <http://rookieelectronics.com/3d-printing-technologies-types/>.



Annexes

A. Fitxa tècnica del PLA utilitzat per a la fabricació de les provetes



| Filament specifications     |            |
|-----------------------------|------------|
| Diameter                    | φ 2.85 mm  |
| Max roundness deviation     | 0.03 mm    |
| Net filament weight         | 750 g      |
| Material Density (ISO 1183) | 1.24 g/cm³ |

| Recommendations  |
|--|
| Plastics absorb moisture from the air. For long periods of time without printing, it is recommended to keep the PLA spools in a box or airtight container with desiccant to keep them dry. |
| PLA emits low levels of gasses and particles when printed. We recommend printing it in a well-ventilated area to ensure a healthy environment.   |

| Printing settings    |                 |
|----------------------|-----------------|
| Extruder temperature | 190 °C - 220 °C |
| Bed temperature      | 65 °C           |
| Speed                | 10-70 mm/s      |
| Retraction speed     | 40 mm/s         |
| Retraction distance  | 4 mm            |
| Cooling fan          | Yes             |
| Minimum layer height | 0.05 mm         |

| Thermal properties            |               |             |
|-------------------------------|---------------|-------------|
|                               | Typical value | Test method |
| Heat deflection temperature B | 65 °C         | ASTM D1505  |
| Vicat softening temperature   | 85 °C         | ASTM D1525  |

| Properties   |
|--|
| Detailed and glossy surface quality                      |
| Good tensile strength                                    |
| Rigid, fragile behaviour                                 |
| Good UV resistance                                       |
| Withstand operating temperatures up to 50 °C.            |
| Odor-free, ideal for educational and office environments |
| Compatible with PVA supports                             |
| Low humidity resistance                                  |

| Mechanical properties |               |             |
|-----------------------|---------------|-------------|
|                       | Typical value | Test method |
| Tensile strength      | MD 110 MPa    | ASTM D682   |
|                       | TD 114 MPa    | ASTM D682   |
| Tensile modulus       | MD 3509 MPa   | ASTM D682   |
|                       | TD 3881 MPa   | ASTM D682   |
| Elongation at break   | MD 160%       | ASTM D682   |
|                       | TD 100%       | ASTM D682   |
| Elmendorf tear        | MD 15 g/ml    | ASTM D1922  |
|                       | TD 13 g/ml    | ASTM D1922  |

Technical data sheet PLA

| Description   |
|---|
| PLA (Polylactic Acid) is a biodegradable, sustainable and food safe polymer made from organic sources.  |
| It is the most common used filament in FFF 3D printers for its ease of use and wide range of applications, especially those not mechanically or thermally demanding. Definitely a good starting point to learn about the 3D Printing manufacturing process. |

More information about PLA: <https://www.bcn3dtechnologies.com/en/3d-printer/filaments/#pla>

Disclaimer: The information or assistance included in this document is accepted at your own risk. Neither BCN3D Technologies, Fundació CIM or its affiliates are responsible for the use of this information, and you must determine for yourself if it is adequate for your own use, for the health and safety of your employees and purchasers of your products and for the protection of the environment. The information given is designed only as a guidance for safe handling, use, processing, storage, transportation, disposal and release and is not to be considered a warranty or quality specification. Those specifications are subject to change without notice. Nothing herein waives any of BCN3D's condition of sale.



## B. Taules amb el recull de mesures prèvies als assaigs

### a. Tracció

Seguidament es mostra la representació de la secció del tram central constant (canya) de la proveta i les dades mesurades prèviament. El valor que apareix a la taula és la mitjana de les 3 mesures realitzades per a cada valor de cada proveta.

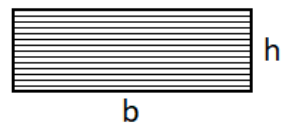


Figura a. Secció central

Taula a. Mesures de les provetes a tracció

| Provetes prismàtiques | Pes (g) | b (mm) | h (mm) | Àrea secció (mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|---------|--------|--------|--------------------------------|
| Nominal               |         | 13     | 7      | 91,00                          |
| 1                     | 20,89   | 13,087 | 7      | 91,61                          |
| 2                     | 20,91   | 13,113 | 7,067  | 92,67                          |
| 3                     | 20,86   | 13,107 | 7,003  | 91,79                          |
| 4                     | 20,87   | 13,133 | 7,043  | 92,50                          |
| 5                     | 20,95   | 13,113 | 7,03   | 92,18                          |
| 6                     | 20,79   | 13,097 | 7,023  | 91,98                          |
| Mitjana               | 20,878  | 13,108 | 7,028  | 92,12                          |



## b. Compensió

Per a les provetes a compensió, es divideix la taula del recull de dades en dos, corresponents a les provetes prismàtiques i a les provetes cilíndriques, tant curtes com llargues, ja que els paràmetres de la secció a mesurar són els mateixos. Per a les provetes prismàtiques es

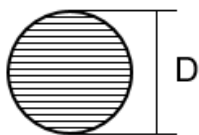


Figura b.1. Secció transversal circular

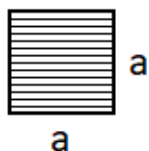


Figura b.2 Secció transversal quadrada

mesura el costat de la secció transversal i la longitud, mentre que per les provetes cilíndriques es mesura el diàmetre i la longitud.

Taula b.0.1 Mesures de les provetes a compensió

| Provetes prismàtiques | Pes (g) | b (mm) | Longitud (mm) | Àrea secció (mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|---------|--------|---------------|--------------------------------|
| 2a-Nominal            |         | 12,7   | 25,4          | 161,290                        |
| 2a-1                  | 4,38    | 12,66  | 25,383        | 160,276                        |
| 2a-2                  | 4,25    | 12,69  | 25,407        | 161,036                        |
| 2a-3                  | 4,12    | 12,673 | 25,477        | 160,605                        |
| 2a-4                  | 4,24    | 12,697 | 25,443        | 161,214                        |
| 2a-5                  | 4,25    | 12,733 | 25,563        | 162,129                        |
| 2a-6                  | 4,19    | 12,677 | 25,437        | 160,706                        |
| 2a-Mitjana            | 4,238   | 12,688 | 25,452        | 160,994                        |
| 4a-Nominal            |         | 12,7   | 50,8          | 161,290                        |
| 4a-1                  | 8,8     | 12,67  | 50,867        | 160,529                        |
| 4a-2                  | 9,16    | 12,657 | 50,75         | 160,200                        |
| 4a-3                  | 8,93    | 12,76  | 50,93         | 162,818                        |
| 4a-4                  | 9,22    | 12,803 | 50,763        | 163,917                        |
| 4a-5                  | 9,01    | 12,59  | 50,893        | 158,508                        |
| 4a-6                  | 9,08    | 12,713 | 50,753        | 161,620                        |
| 4a-Mitjana            | 9,033   | 12,699 | 50,826        | 161,265                        |

### c. Flexió

Per últim, es mostra la secció de la proveta i les dades mesurades per les provetes a flexió.

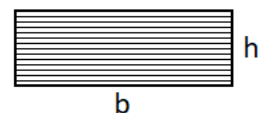


Figura c.1 Secció central

Taula c.1 Mesures de les provetes a flexió

| Provetes prismàtiques | Pes (g) | b (mm) | h (mm) | Àrea secció (mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|---------|--------|--------|--------------------------------|
| Nominal               |         | 3,2    | 12,7   | 40,64                          |
| 1                     | 5,88    | 3,233  | 12,74  | 41,19                          |
| 2                     | 5,91    | 3,207  | 12,77  | 40,95                          |
| 3                     | 5,86    | 3,233  | 12,753 | 41,23                          |
| 4                     | 5,94    | 3,213  | 12,787 | 41,08                          |
| 5                     | 5,83    | 3,133  | 12,783 | 40,05                          |
| 6                     | 5,86    | 3,217  | 12,723 | 40,93                          |
| Mitjana               | 5,884   | 3,206  | 12,759 | 40,91                          |